

TUGAS AKHIR - TL 141584

STUDI OPTIMISASI *HEAT FLUX* DAN *WELDING SPEED* PADA PENGELASAN LASER FIBER TERHADAP LEBAR LASAN, KEDALAMAN PENETRASI DAN TEGANGAN SISA ESSHETE 1250 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

TIARA ANSELLYA RESTY YOLANDA
NRP 02511440000003

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TL 141584

STUDI OPTIMISASI *HEAT FLUX* DAN *WELDING SPEED* PADA PENGELASAN LASER FIBER TERHADAP LEBAR LASAN, KEDALAMAN PENETRASI DAN TEGANGAN SISA ESSHETE 1250 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

**TIARA ANSELLYA RESTY YOLANDA
NRP 02511440000003**

**Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc**

**DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



FINAL PROJECT - TL 141584

**OPTIMIZATION OF HEAT FLUX AND WELDING
SPEED ON FIBER LASER WELDING FOR
PENETRATION DEPTH, WELD WIDTH, AND
RESIDUAL STRESS OF ESSHETE 1250 WITH
FINITE ELEMENT METHOD**

**TIARA ANSELLYA RESTY YOLANDA
NRP 02511440000003**

**Advisor Lectures :
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc**

**MATERIAL & METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018**

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI OPTIMISASI *HEAT FLUX* DAN *WELDING SPEED* PADA PENGELASAN LASER FIBER TERHADAP LEBAR LASAN, KEDALAMAN PENETRASI DAN TEGANGAN SISA ESSHETE 1250 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Tiara Ansellya Resty Yolanda
NRP. 02511440000003

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.T., Ph.D..... (Pembimbing I)
2. Wikan Jatimurti, S.T., M.T., Ph.D..... (Pembimbing II)



STUDI OPTIMISASI *HEAT FLUX* DAN *WELDING SPEED* PADA PENGELASAN LASER FIBER TERHADAP LEBAR LASAN, KEDALAMAN PENETRASI DAN TEGANGAN SISA ESSHETE 1250 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama : Tiara Ansellya Resty Yolanda
NRP : 02511440000003
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS
Dosen Pembimbing: Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

Abstrak

Parameter input pengelasan laser berpengaruh terhadap kualitas hasil pengelasan. Hasil pengelasan berupa lebar lasan, kedalaman penetrasi dan tegangan sisa menentukan kualitas dari sambungan logam. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan hasil pengelasan laser optimal digunakan *Finite Element Method* (FEM) dan *Response Surface Methodology* (RSM). Proses simulasi pada material Esshete 1250 dilakukan sebanyak 12 kali dengan parameter input yang berbeda. Parameter input yang pertama adalah *heat flux* dengan variasi power input 2000 W, 2250 W, 2500 W, dan 2750 W. Parameter input yang kedua adalah *welding speed* dengan variasi 2,5 m/min, 3 m/min, dan 3,5 m/min. Hasil simulasi menggambarkan pengaruh *heat flux* yang semakin tinggi akan meningkatkan lebar lasan, memperdalam kedalaman penetrasi dan meningkatkan tegangan sisa. Hasil simulasi juga menggambarkan pengaruh *welding speed* yang semakin tinggi akan mempersempit lebar lasan, mengurangi kedalaman penetrasi, dan mengurangi tegangan sisa. Hasil dari simulasi divalidasi menggunakan persamaan matematis dan didapatkan hasil yang valid.

Kata kunci : Esshete 1250, *FEM*, Laser, Pengelasan, *RSM*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

OPTIMIZATION OF HEAT FLUX AND WELDING SPEED ON FIBER LASER WELDING FOR DEPT, WELD WIDTH, AND RESIDUAL STRESS OF ESSHETE 1250 WITH FINITE ELEMENT METHOD

Name : Tiara Ansellya Resty Yolanda
SRN : 02511440000003
Departement : Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS
Advisor Lectures : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

Abstract

Laser welding input parameters have significant effect on the welding bead profile. Welding bead profile like width weld, penetration depth, and residual stress determine the quality of butt joint. This study was done to get optimal laser welding bead profile parameters using Finite Element Method (FEM) and Response Surface Methodoly (RSM). Simulation process on Esshete 1250 materials were done 12 times with different input parameters. The first input parameters were power input 2000 W, 2250 W, 2500 W, and 2750 W. The second parameters were welding speed of 2,5 m/min, 3 m/min, and 3,5 m/min. From the result simulation were known that the higher heat flux will increase weld width, deepen penetration depth, and increase residual stress. Another case, the higher welding speed will make narrow weld width, reduce penetration depth, and reduce residual stress. Simulation result was validated with mathematical equation and obtained valid result.

Keyword : Esshete 1250, FEM, Laser, Welding, RSM

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji Syukur atas berkat Allah SWT yang telah memberikan kasihNya sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun Laporan Tugas Akhir yang berjudul : **Optimisasi *Heat Flux* dan *Welding Speed* pada Pengelasan Laser Fiber terhadap Kedalaman Penetrasi, Lebar Lasan dan Tegangan Sisa Esshete 1250 dengan Metode Elemen Hingga.**

Pada kesempatan kali ini penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penyusun Bapak Muhammad Ansori dan Ibu Dwi Endang Puji Rahayu atas semua doa, dukungan moril dan materiil yang selalu dicurahkan.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing pertama Tugas Akhir yang telah memberikan bekal dan ilmu yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing kedua Tugas Akhir yang telah memberikan bekal dan ilmu yang sangat bermanfaat.
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
6. Teman-teman Paguma yang selalu membantu dalam segala kesulitan penyusun dalam menyusun Laporan Tugas Akhir.
7. Seluruh anggota MT16 yang selalu menemani penulis saat suka maupun duka.

Penyusun menyadari adanya banyak kekurangan dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini. Besar harapan penyusun akan saran dan kritik yang sifatnya membangun. Semoga tulisan ini dapat selalu bermanfaat. Amin.

Surabaya, Januari 2018
Tiara Ansellya Resty Yolanda

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Lingkup Penelitian	3
1.5 Tujuan Penelitian	4
1.6 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Laser (<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>).....	13
2.3 Teori Optimisasi	18
2.4 Metode Elemen Hingga.....	19
2.5 Distribusi Temperatur	20
2.6 Tegangan Termal Selama Pengelasan.....	22
2.7 Pengukuran Tegangan Sisa.....	24
2.8 Material Essete 1250	25
BAB III METODOLOGI	
3.1 Metode Penelitian	27
3.2 Spesifikasi Material dan Parameter <i>Laser Welding</i>	28
3.3 Peralatan Penelitian.....	31
3.4 Alur Permodelan dengan <i>Software</i>	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Permodelan	35
4.2 Perhitungan Pembebanan	36
4.3 Hasil Penelitian (Permodelan)	39

4.4	Optimasi Hasil Simulasi	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	93
5.2	Saran	93
DAFTAR PUSTAKA		xix
LAMPIRAN		xxiii
BIODATA PENULIS		xlvi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Hubungan antara Kedalaman Penetrasi dan Heat Input (Alcock, 2016).....	6
Gambar 2. 2 Skema Pengelasan pada Dua Material yang Berbeda (Casalino 2016).....	7
Gambar 2. 3 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen (Jiang, 2016)	8
Gambar 2. 4 Metode Pengelasan Laser: (a) Metode konduksi kontinu, (b) Metode keyhole kontinu, (c) Metode konduksi single pulse, (d) Gambar permukaan lasan selama pengelasan laser mode titik (Sundqvist, 2015)	15
Gambar 2. 5 Ilustrasi Mekanisme Pengelasan Laser Keyhole: (a) Keyhole dilihat dari depan, (b) Keyhole dilihat dari bagian lasan yang panjang (Sundqvist, 2015).....	17
Gambar 2. 6 Proses Pengerjaan pada Metode Elemen Hingga ..	19
Gambar 2. 7 Skema Model Termal pada Analisa Material Tiga Dimensi (Bhadra, 2014).....	21
Gambar 2. 8 Distribusi Temperatur dan Tegangan Selama Pemanasan (AWS Vol 1, 2001).....	23
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 3. 2 Dimensi Material Permodelan.....	30
Gambar 3. 3 Diagram Alir Permodelan Laser Welding	32
Gambar 3. 4 Hasil Meshing pada Spesimen	33
Gambar 4. 1 Geometri Weld Spot	35
Gambar 4. 2 Temperatur Global Minimum	40
Gambar 4. 3 Temperatur Global Maksimum	41
Gambar 4. 4 Distribusi Temperatur untuk Menghitung Lebar Lasan.....	42
Gambar 4. 5 Perbedaan Koordinat Antar 2 Node pada Sumbu Y	42
Gambar 4. 6 Distribusi Temperatur untuk Menghitung Kedalaman Penetrasi	43

Gambar 4. 7 Perbedaan Koordinat Antar 2 Node pada Sumbu Z	43
Gambar 4. 8 Lebar Lasan pada Welding Speed 2,5 m/min	45
Gambar 4. 9 Lebar Lasan pada Welding Speed 3 m/min	45
Gambar 4. 10 Lebar Lasan pada Welding Speed 3,5 m/min	46
Gambar 4. 11 Lebar Lasan Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan Welding Speed	47
Gambar 4. 12 Lebar Lasan dengan Power 2000 W	48
Gambar 4. 13 Lebar Lasan dengan Power 2250 W	49
Gambar 4. 14 Lebar Lasan dengan Power 2500 W	49
Gambar 4. 15 Lebar Lasan dengan Power 2750 W	50
Gambar 4. 16 Lebar Lasan Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan Power Input	51
Gambar 4. 17 Kedalaman Penetrasi pada Welding Speed 2,5 m/min	52
Gambar 4. 18 Kedalaman Penetrasi pada Welding Speed 3 m/min	53
Gambar 4. 19 Kedalaman Penetrasi pada Welding Speed 3,5 m/min	54
Gambar 4. 20 Kedalaman Penetrasi Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan Welding Speed.....	55
Gambar 4. 21 Kedalaman Penetrasi dengan Power 2000 W	56
Gambar 4. 22 Kedalaman Penetrasi dengan Power 2250 W	57
Gambar 4. 23 Kedalaman Penetrasi dengan Power 2500 W	58
Gambar 4. 24 Kedalaman Penetrasi dengan Power 2750 W	59
Gambar 4. 25 Kedalaman Penetrasi Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan Power Input	60
Gambar 4. 26 Geometri Pengukuran Tegangan Sisa (Pa)	61
Gambar 4. 27 Distribusi Thermal Stress Arah Sumbu Y pada Pengelasan Esshete 1250 Case 1	62
Gambar 4. 28 Tegangan Sisa pada Welding Speed 2,5 m/min	64

Gambar 4. 29	Tegangan Sisa pada Welding Speed 3 m/min.....	65
Gambar 4. 30	Tegangan Sisa pada Welding Speed 3,5 m/min ..	66
Gambar 4. 31	Tegangan Sisa Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan Welding Speed	67
Gambar 4. 32	Tegangan Sisa dengan Power 2000 W	68
Gambar 4. 33	Tegangan Sisa dengan Power 2250 W	69
Gambar 4. 34	Tegangan Sisa dengan Power 2500 W	70
Gambar 4. 35	Tegangan Sisa dengan Power 2750 W	71
Gambar 4. 36	Tegangan Sisa Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan Power Input	72
Gambar 4. 37	Pengaruh Welding Speed dan Power Input terhadap Lebar Lasan.....	73
Gambar 4. 38	Pengaruh Welding Speed dan Power Input terhadap Kedalaman Penetrasi	74
Gambar 4. 39	Pengaruh Welding Speed dan Power Input terhadap Tegangan Sisa	75
Gambar 4. 40	<i>Contour Plot</i> RSM Lebar Lasan.....	78
Gambar 4. 41	Surface Plot Simulasi Lebar Lasan.....	79
Gambar 4. 42	Analisa Lebar Lasan Minimum.....	79
Gambar 4. 43	Contour Plot RSM Kedalaman Penetrasi.....	81
Gambar 4. 44	Surface Plot Simulasi Kedalaman Penetrasi	82
Gambar 4. 45	Analisa Kedalaman Penetrasi Maksimum	83
Gambar 4. 46	Contour Plot RSM Tegangan Sisa.....	85
Gambar 4. 47	Surface Plot Simulasi Tegangan Sisa	86
Gambar 4. 48	Analisa Tegangan Sisa Minimum	86
Gambar 4. 49	Optimasi Response Pengelasan Laser Esshete 1250	88

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Penelitian Laser Welding Sebelumnya	9
Tabel 2.2	Standar Komposisi Kimia Material Eshete 1250 menurut ASTM A213	26
Tabel 3.1	Komposisi Kimia Eshete 1250 (Sandvik, 2017)	28
Tabel 3.2	Properti Material Eshete 1250 (Sandvik, 2017)	29
Tabel 3. 3	Parameter Laser Welding	31
Tabel 4. 1	Parameter Pengelasan pada Setiap Case	37
Tabel 4. 2	Ukuran Weld Bead dari Distribusi Temperatur	44
Tabel 4. 3	Hasil Pengukuran Tegangan Sisa pada Pengelasan ...	63
Tabel 4. 4	Desain Eksperimen dan Analisis Data Lebar Lasan ..	76
Tabel 4. 5	Desain Eksperimen dan Analisis Data Kedalaman Penetrasi	80
Tabel 4. 6	Desain Eksperimen dan Analisis Data Tegangan Sisa	84

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelasan adalah sebuah proses fabrikasi penyambungan suatu material dengan material lainnya yang biasanya berupa logam atau material thermoplastis. Proses pengelasan dilakukan dengan mendidihkan bidang sambungan dengan menambahkan material penyambung untuk membentuk genangan material lebur yang ketika dingin akan menjadi sambungan yang kuat. Berdasarkan definisi dari Deutsche Industries Normen (DIN), las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam dan logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dan definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas. Meskipun konsep pengelasan terlihat sederhana, namun pengaruh yang dihasilkan oleh tenaga las tidaklah sederhana. Pengelasan yang dilakukan pada material akan menghasilkan kekasaran permukaan, *impurities*, kecacatan, dan sifat yang bervariasi (AWS, 2001). Proses dan prosedur pengelasan sudah dikembangkan untuk mengatasi kesulitan dalam mengendalikan input sebagainya. Panas, tekanan maupun keduanya.

Pada beberapa tahun terakhir, metode *laser welding* semakin banyak dikembangkan. *Laser welding* adalah proses pengelasan yang dihasilkan dari konversi energi panas dari sinar laser sehingga material meleleh dan membuat sambungan dengan material yang lain. Sinar laser yang bersifat kontinu banyak digunakan untuk pengelasan yang membutuhkan kedalaman penetrasi, sedangkan pengelasan laser yang tidak kontinu banyak digunakan



dalam proses pengelasan material yang tipis. Kelebihan pengelasan laser menurut Xiaodong (2010) adalah distorsi yang rendah, kecepatan pengelasan yang tinggi, dan *heat affected zone* (HAZ) yang sempit. Hal ini terjadi karena pengelasan menggunakan sinar laser yang monokromatik dengan daya input yang cukup, nilai iradiasi yang tinggi dan pemanasan lokal yang lebih mudah didapatkan dibandingkan dengan pengelasan konvensional selain pengelasan laser. Sementara kerugian pengelasan laser adalah pada biayanya yang relatif mahal dan kemampuannya yang terbatas. Kedalaman penetrasi sinar laser juga bergantung pada kapasitas sistem laser. Kontroling yang cermat juga diperlukan untuk menghindari proses penguapan material di sekitar lasan karena temperatur yang tinggi.

Penelitian tentang pengelasan laser banyak dilakukan untuk mengoptimisasi parameter-parameter input proses pengelasan laser agar dihasilkan produk lasan yang terbaik. Parameter yang dimaksud adalah *laser power*, *welding speed*, dan *laser focal position*. Respon pengelasan yang diperhatikan adalah kedalaman penetrasi, lebar lasan, struktur mikro, geometri *weld pool*, sifat *tensile*, sifat *hardness*, lebar HAZ, daerah fusi, dan sebagainya. Optimisasi biasanya dilakukan dengan metode elemen hingga dan dibantu oleh *software-software* yang mumpuni di bidangnya.

Adapun penelitian yang akan dilakukan saat ini adalah optimisasi *heat flux* dan *welding speed* pada pengelasan laser material Esshete 1250 dan membandingkan hasilnya terutama pada bagian kedalaman penetrasi dan lebar lasannya. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS 17.1 dengan metode elemen hingga yang diterapkan untuk mendapatkan hasil yang optimal.



1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan penjabaran latar belakang diatas dapat ditarik beberapa permasalahan dalam penetitian ini yaitu :

1. Bagaimana pengaruh *heat flux* terhadap kedalaman penetrasi, lebar lasan, dan teganagan sisa Esshete 1250 menggunakan metode pengelasan laser *fiber*?
2. Bagaimana pengaruh *welding speed* terhadap kedalaman penetrasi, lebar lasan, dan teganagan sisa Esshete 1250 menggunakan metode pengelasan laser *fiber*?
3. Bagaimana parameter *heat input* dan *welding speed* agar pengelasan laser *fiber* pada Esshete 1250 mencapai kondisi yang optimal?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini berjalan dengan terarah serta memiliki kejelasan dalam analisa permasalahan, maka dilakukan beberapa batasan permasalahan, diantaranya yaitu :

1. Material yang digunakan adalah Esshete 1250 standar yang memiliki kadar karbon 0,1 % Series yang dianggap homogen dan belum mengalami *heat treatment*
2. Pengelasan dilakukan pada udara kamar
3. Proses pengelasan dilakukan oleh robot yang sudah diatur sesuai dengan spesifikasi parameter input

1.4 Lingkup Penelitian

Adapun lingkup dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Material yang digunakan adalah Esshete 1250 standar



2. *Laser welder* yang digunakan adalah IPG YLR-4000 *laser fiber* dengan power input rata-rata mencapai 4 kW.
3. *Laser welder header* di instal pada robot ABB IRB4400.

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diangkat dalam penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh *heat flux* terhadap kedalaman penetrasi dan lebar lasan Esshete 1250 menggunakan metode pengelasan laser *fiber*.
2. Menganalisis pengaruh *welding speed* terhadap kedalaman penetrasi dan lebar lasan Esshete 1250 menggunakan metode pengelasan laser *fiber*.
3. Mengetahui parameter *heat input* dan *welding speed* agar pengelasan laser *fiber* pada Esshete 1250 mencapai kondisi yang optimal.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu sebagai referensi pengembangan dalam proses pengelasan lanjut dalam dunia industri dan sebagai referensi untuk peneliti-peneliti berikutnya dalam mengembangkan ilmu mengenai *laser welding*.

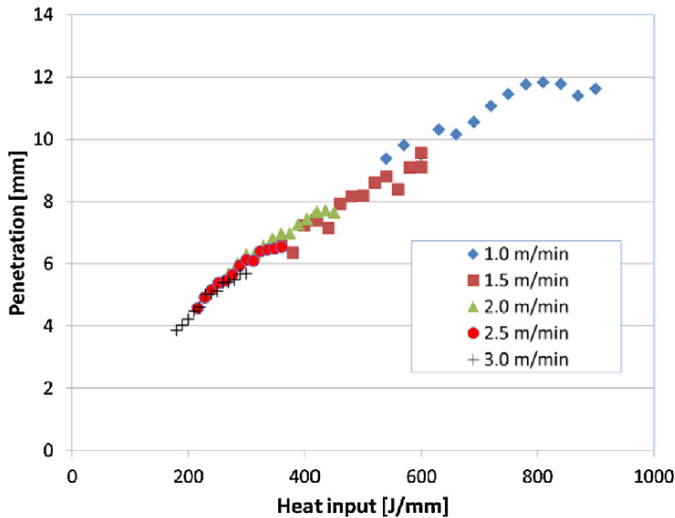
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Saat ini studi mengenai permodelan *Finite Element* 3-D sudah dikembangkan untuk menganalisis *transient thermal*. Bhadra (2014) melakukannya pada material stainless steel AISI 304. Distribusi temperaturnya diprediksi menggunakan permodelan numerik dan dibandingkan dengan hasil eksperimen dan juga literatur. Bhadra (2014) menggunakan parameter *laser power* dan *welding speed* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap *cooling rate*, HAZ, dan *peak temperature increment*. Setelah berhasil dilakukan dan divalidasi, terdapat beberapa hasil yang dapat mendukung penelitian selanjutnya mengenai pengelasan laser. *Finite Element* yang digunakan untuk memodelkan *transient thermal* memiliki error maksimal sebesar 5% jika dibandingkan dengan eksperimen dan studi literatur. Hasilnya, *cooling rate* mempengaruhi *welding power* dan *welding speed* secara signifikan. *Heat affected zone* dan *fusion zone* meningkat dengan meningkatnya *welding power* dan menurunnya *welding speed*. *Peak temperature* akan lebih tinggi pada nilai dari *rate heat input* yang rendah jika dibandingkan dengan nilai *rate heat input* yang lebih tinggi.

Alcock (2016) dalam percobaannya menggunakan laser dioda sebagai alat pengelasan pada material stainless steel 304L. Material stainless steel 304L dipilih karena memiliki sifat ketahanan korosi dan *weldability* yang baik. Pada penelitiannya, Alcock (2016) menggunakan parameter *heat input laser* dan *welding speed* untuk mendapatkan lebar pengelasan dan kedalaman penetrasi yang terbaik. *Heat input* yang digunakan berkisar 9 kW sampai 15 kW. Sementara *welding speed* yang digunakan adalah sebesar 1m/menit sampai 3m/menit. Untuk melakukan pengelasan dioda laser pada plat yang memiliki ketebalan 10 mm, *welding speed* sebesar 1.5 m/menit dan *heat*

input sebesar 12 kW adalah yang paling optimal hasilnya baik dari segi kedalaman penetrasi maupun dari segi *weld width*.

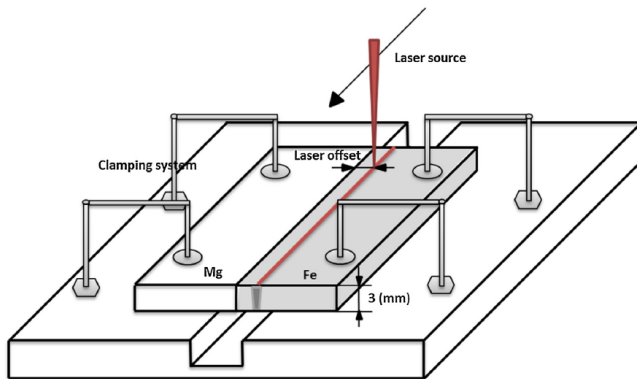


Gambar 2. 1 Hubungan antara Kedalaman Penetrasi dan Heat Input (Alcock, 2016)

Pengelasan laser dilakukan tidak hanya pada dua material dengan spesifikasi yang sama namun juga pada penyambungan dua material dengan spesifikasi yang berbeda. Austenitik stainless steel yang biasa diketahui dengan seri 300 memiliki harga yang relatif terjangkau, sifat materialnya stabil untuk aplikasi peralatan yang membutuhkan jangka waktu yang panjang. Studi komparasi antara stainless steel AISI 304 dan 316 telah dilakukan oleh Kumar (2016). Kumar (2016) menggunakan parameter *power input* (P), *scanning speed* (S), dan *pulse width* (W) untuk mengetahui nilai UTS maksimal dan *weld width* minimal dari masing-masing material.

Penelitian lain dilakukan pada stainless steel 316 menggunakan laser dengan jenis yang berbeda. *Fiber laser*

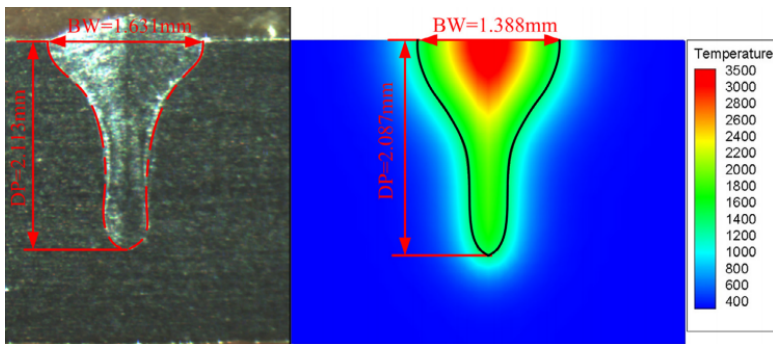
digunakan dalam pengelasan paduan Magnesium dan Stainless Steel 316 oleh Casalino (2016). Metode yang dilakukan oleh Casalino (2016) dikenal dengan *Laser Offset Welding* (LOW). Metode ini menggabungkan material yang memiliki perbedaan sifat termal yang besar dan *metallurgical compactibility* yang rendah. Hasilnya, LOW memiliki kapabilitas untuk menjadi teknik penggabungan dua material yang berbeda karena menghasilkan UTS sebesar 100 Mpa sehingga produk lasan memiliki ikatan yang efektif.



Gambar 2. 2 Skema Pengelasan pada Dua Material yang Berbeda(Casalino 2016)

Pengelasan menggunakan *fibre* laser telah dimodelkan oleh Jiang (2016). Jiang (2016) melakukan simulasi proses pengelasan laser menggunakan optimisasi dengan metode elemen hingga, Kriging dan NSGA II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*) pada material stainless steel 316L. Parameter pengelasan yang digunakan antara lain adalah power laser (LP), kecepatan pengelasan (WS), dan posisi fokus laser (LF). Simulasi dilakukan dengan material yang didesain tiga dimensi untuk mendapatkan *bead width* (BW) dan kedalaman penetrasi (DOP). Metamodel Kriging dilakukan untuk mengetahui hubungan antara parameter

input dan respon output yang terjadi. Kemudian, NSGA-II digunakan untuk mencari parameter yang optimal dalam simulai yang dilakukan. Setelah simulasi selesai, Jiang (2016) membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen dan didapatkan error yang sangat kecil pada keduanya.



Gambar 2. 3 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen (Jiang, 2016)

Studi tentang pengaruh sudut laser terhadap *weld pool geometry*, struktur mikro dan sifat tensile pada sambungan las dilakukan oleh Khumar (2017). Khumar (2017) melanjutkan studinya yang dia lakukan pada tahun 2016 dengan metode dan parameter lain mengenai pengelasan laser. Pada penelitian ini Khumar (2017) menggunakan parameter sudut pengelasan, *laser power*, dan *welding speed*. Hasilnya, pengelasan menggunakan Nd:YAG dengan sudut 85.5 memiliki kekerasan mikro 280 HV dan 576.26 Mpa. Namun UTS tertinggi dicapai pada sudut percobaan 85.95 dengan besar *laseer power* 455.52 W dan *welding speed* 4.95 mm/detik.

Pengelasan laser tidak hanya dilakukan untuk material yang sama dan material yang berbeda. Namun juga dapat dilakukan dengan memodifikasi pengelasan laser bersama dengan metode pengelasan yang lain seperti pengelasan gas. Pengelasan *hybrid laser – TIG* dilakukan oleh Ragavendran (2017). Ragavendran



(2017) menggunakan parameter *laser power*, frekuensi *pulsed*, durasi *pulsed*, dan arus TIG sebagai parameter untuk mengetahui pengaruhnya terhadap *weld bead width*, daerah *weld cross-sectional*, dan kedalaman penetrasi (DOP). Teknik optimisasi digunakan untuk mengetahui parameter yang optimal dalam penelitian ini. Metode respon permukaan (RSM) ditemukan sebagai teknik yang akurat untuk mengetahui optimisasi pada *hybrid laser-TIG*.

Laser power diketahui sebagai parameter yang paling penting untuk mengontrol kedalaman penetrasi (DOP) tetapi tidak mempengaruhi lebar *weld bead*. Arus TIG dan durasi *pulsed* diketahui sebagai parameter paling signifikan yang berpengaruh terhadap lebar *weld bead* karena arus TIG dan durasi *pulsed* yang masuk menaikkan *heat input* pada material. Pada penelitian yang Ragavendran (2017) lakukan, optimisasi pengelasan didapatkan pada *laser power* diantara 3670 sampai 3750 W, arus pengelasan diantara 110 sampai 120 Ampere, frekuensi *pulse* diantara 11 sampai 12 Hz dan durasi *pulse* dari 9 sampai 10 ms untuk pengelasan pada pelat 316LN dengan ketebalan 5.6 mm.

Tabel 2. 1 Penelitian Laser Welding Sebelumnya

No	Penelitian Laser Welding Sebelumnya	
1	Judul	<i>Effect of Process Parameters on Thermal History of Laser Welding of AISI-304 Stainless Steel</i>
	Peneliti	Rakesh Bhadra, Pankaj Biswas, dan M. Ravi Sankar
	Metode	<i>Finite element</i> termal 3 dimensi digunakan untuk menganalisa <i>heat transfer</i> dan distribusi temperatur pada <i>laser welding</i> . Penelitian ini menggunakan parameter <i>laser power</i> dan <i>welding speed</i> untuk mengetahui pengaruhnya terhadap <i>cooling rate</i> , HAZ, dan <i>peak temperature increment</i> .
	Hasil	<i>Cooling rate</i> mempengaruhi <i>welding power</i>



		dan <i>welding speed</i> secara signifikan. <i>Heat affected zone</i> dan <i>fusion zone</i> meningkat dengan meningkatnya <i>welding power</i> dan menurunnya <i>welding speed</i> . <i>Peak temperature</i> akan lebih tinggi pada nilai dari <i>rate heat input</i> yang rendah jika dibandingkan dengan nilai <i>rate heat input</i> yang lebih tinggi.
2	Judul	<i>Diode Laser Welding of Stainless Steel 304L</i>
	Peneliti	J.A. Alcock dan B. Baufeld
	Metode	Eksperimen dilakukan menggunakan <i>laserline</i> 15 kW dengan panjang gelombang <i>diode laser</i> 950 sampai 1030 nm, <i>laserline welding head</i> OTS2, dan <i>glass fibre HIGYAG</i> dengan panjang 20 m dan diameter inti 1.0 mm.
	Hasil	Sinar laser dioda dengan power diantara 1 kW dan 15 kW memiliki diameter sinar minimum 1.2 mm dan panjang Rayleigh diantara 4 mm dan 1 mm. <i>Laser power</i> efektif menurun dengan <i>laser power</i> mencapai 89% pada power 15 kW.
3	Judul	<i>Comparative Study of Pulsed Nd:YAG Laser Welding of AISI 304 and AISI 316 Stainless Steels</i>
	Peneliti	Nikhil Kumar, Manidipto Mukherjee, dan Asish Bandyopadhyay
	Metode	Eksperimen menggunakan stainless steel AISI 304 dan AISI 316 dengan ukuran 100 mm x 20 mm x 1.5 mm. Eksperimen dikonduksi pada generator laser JK600HP Nd:YAG yang diintegrasikan dengan robot kontrol ABB IRB 1410.
	Hasil	Lebar <i>pulsed</i> adalah faktor paling signifikan yang mempengaruhi <i>ultimate tensile strength</i>



		pada SS304 dan SS316. <i>Laser power</i> adalah faktor paling signifikan yang mempengaruhi lebar lasan SS304.
4	Judul	<i>Laser Offset Welding of AZ316B Magnesium Alloy to 316 Stainless Steel</i>
	Peneliti	G. Casalino, P. Guglielmi, V. D. Lorusso, M. Mortello, P. Peyre, dan D. Sorgente
	Metode	Eksperimen menggunakan sistem laser dengan mesin <i>multi-axes</i> , sebuah sistem <i>gas shielding</i> dan sebuah <i>workbench</i> dengan <i>clamp</i> dan meja pendukung. Laser jenis Yb-YAG dengan panjang gelombang 1030 nm dan maksimum power 10 kW. Diameter serat optik Yb adalah 200 μm . Titik fokus berdiameter sekitar 400 μm dan didistribusikan dari permukaan <i>stainless steel</i> dengan prinsip LOW (<i>Laser Offset Welding</i>).
	Hasil	Kelemahan Magnesium pada proses pengelasan laser fusi <i>stainless steel</i> dihindari apabila dilakukan tanpa <i>interposing interlayer</i> . Namun teknik LOW terbukti berpotensi untuk menghasilkan sambungan las <i>Mg-Steel</i> yang baik.
5	Judul	<i>Optimization of Laser Welding Process Parameters of Stainless Steel 316L Using FEM, Kriging and NSGA-II</i>
	Peneliti	Ping Jiang, Chaochao wang, Qi Zhou, Xinyu Shao, Leshi Shu, dan Xiongbin Li
	Metode	Penelitian mengkombinasi metamodel Kriging dan NSGA-II. Metamodel Kriging digunakan untuk membuat hubungan antara proses parameter input las dan profil lasan. NSGA-II digunakan untuk memfasilitasi desain eksplorasi dan nilai optimum yang dicari. Keseluruhan proses optimisasi



		menggunakan FEM, Kriging dan metode NSGA-II.
Hasil		Konstruksi model 3D FEM divalidasi dengan eksperimen <i>laser welding</i> yang sebenarnya dan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil eksperimen. Konstruksi metamodel Kriging diantara parameter dan profil lasan menunjukkan error yang relatif kecil dengan hasil simulasi. ANOVA input menunjukkan <i>laser power</i> dan <i>welding speed</i> berpengaruh signifikan terhadap <i>bead weld</i> . <i>Laser focal position</i> sangat mempengaruhi kedalaman penetrasi.
6	Judul	<i>Study on Laser Welding of Austenitic Stainless Steel by Varying Incident Angle of Pulsed Laser Beam</i>
	Peneliti	Nikhil Kumar, Manidipto Mukherjee, dan Asish Bandyopadhyay
	Metode	Eksperimen menggunakan stainless steel AISI 304 dengan ukuran 100 mm x 20 mm x 1.5 mm. Eksperimen dikonduksi pada generator laser JK600HP Nd:YAG yang diintegrasikan dengan robot kontrol ABB IRB 1410.
	Hasil	Logam las dengan sudut las 85.5 derajat memiliki fraksi presipitasi karbida dan δ -ferit lebih tinggi jika dibandingkan dengan logam lasan lain. Sudut ini juga menghasilkan nilai rata-rata <i>microhardness</i> (~280 Hv) dan kekuatan <i>tensile</i> (579.26 Mpa) yang paling tinggi.
7	Judul	<i>Optimization of Hybrid Laser-TIG Welding of 316LN Steel Using Response Surface Methodology (RSM)</i>
	Peneliti	M. Ragavendran, N. Chandrasekhar, R.



	Ravikumar, Rajesh Saxena, M. Vasudevan, dan A. K. Bhaduri
Metode	Pelat 316LN berukuran 300 mm x 125 mm x 5.6 mm yang dibersihkan dengan aseton untuk menghilangkan kotoran dan kontaminasi. Penelitian dilakukan untuk mengetahui parameter pengelasan terhadap kedalaman penetrasi, lebar lasan, dan area <i>cross-sectional</i> lasan.
Hasil	Semua parameter yang berupa <i>laser power</i> , <i>pulse frequency</i> , durasi <i>pulse</i> dan arus TIG diketahui dapat mengontrol hasil lasan secara signifikan. <i>Laser power</i> parameter paling penting untuk mengontrol kedalaman penetrasi tetapi tidak mempengaruhi lebar lasan. Arus TIG dan durasi <i>pulse</i> parameter paling penting yang mempengaruhi hasil lasan karena meningkatkan <i>heat input</i> pada material.

2.2 Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)

Laser merupakan singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* merupakan mekanisme suatu alat yang memancarkan radiasi elektromagnetik yang biasanya dalam bentuk cahaya baik cahaya yang dapat dilihat maupun yang tidak dapat dilihat dengan mata normal, melalui proses pancaran terstimulasi. Laser hadir dari berbagai penelitian ilmuwan yang selalu disempurnakan. Pada tahun 1971, Albert Einstein menjelaskan penyerapan negatif, atau yang disebut *Stimulated Emission of Radiation* (SER pada kata LASER). Penyerapan negatif ini diujicobakan pada tahun 1928, namun baru pada tahun 1960 fungsi utama laser dikembangkan oleh Maiman (pada tulisannya yang berjudul *Stimulated Optical radiation in Ruby*). Setelah itu barulah perkembangan laser semakin cepat. Dalam

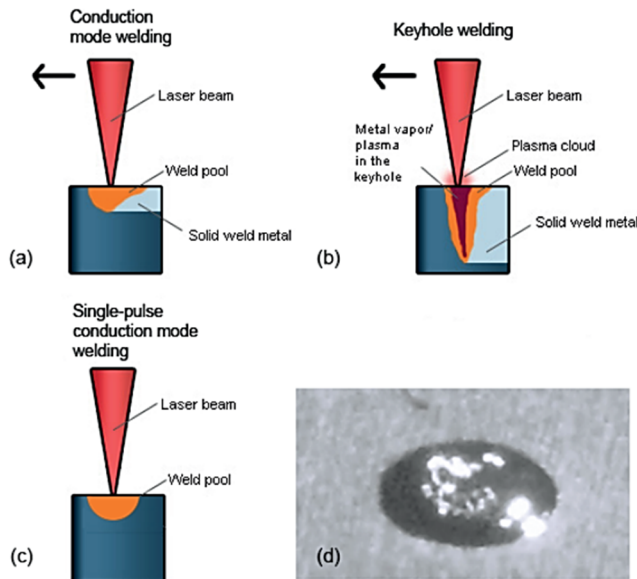


beberapa tahun, puluhan jenis laser diciptakan. Laser pertama adalah laser ruby berdenyut (*pulsed ruby laser*), namun pada tahun yang sama laser gas HeNe diproduksi. Laser gas HeNe adalah laser pertama yang dijual secara komersial (tahun 1961 oleh Spectra-Physics). Laser pertama ini memiliki level daya beberapa mW, dan diaplikasikan pada pengukuran.

2.2.1 Pengelasan Sinar Laser

Pengelasan menggabungkan dua logam dengan melelehkan sisi-sisinya dan setelah solidifikasi keduanya membentuk sambungan. Pengelasan laser menerangi material dengan sinar laser yang intensitasnya tinggi. Berdasarkan intensitasnya I , dua metode pengelasan yang berbeda dapat dihasilkan. Pengelasan metode konduksi terjadi apabila $I < 1 \text{ MW/cm}^2$ dan pengelasan dengan metode *keyhole* terjadi apabila $I > 1 \text{ MW/cm}^2$ (diantara dua metode ini juga terdapat metode transisi). Selain itu, lasan yang kontinu dan lasan titik dapat dibedakan.

Material dipanaskan di atas temperatur lelehnya namun tetap berada di bawah temperatur penguapannya. Pengelasan mode *keyhole* terjadi ketika sinar laser memiliki intensitas yang cukup tinggi (power densitas $I > 1 \text{ MW/cm}^2$) untuk menaikkan temperatur di permukaan di atas titik didihnya. Kemudian sinar laser akan mendidihkan material dan lelehannya di dorong di sepanjang dinding *keyhole* dengan tekanan ablasi. Absorpsi dari sinar laser akan meningkat didalam *keyhole* karena adanya perubahan sudut bersamaan dengan penangkapan sinar, disebut refleksi ganda, yang memberikan total absorpsi lebih tinggi.



Gambar 2. 4 Metode Pengelasan Laser: (a) Metode konduksi kontinu, (b) Metode keyhole kontinu, (c) Metode konduksi single pulse, (d) Gambar permukaan lasan selama pengelasan laser mode titik (Sundqvist, 2015)

Pengelasan sinar laser dengan kualitas yang tinggi ditentukan oleh beberapa hal seperti berikut :

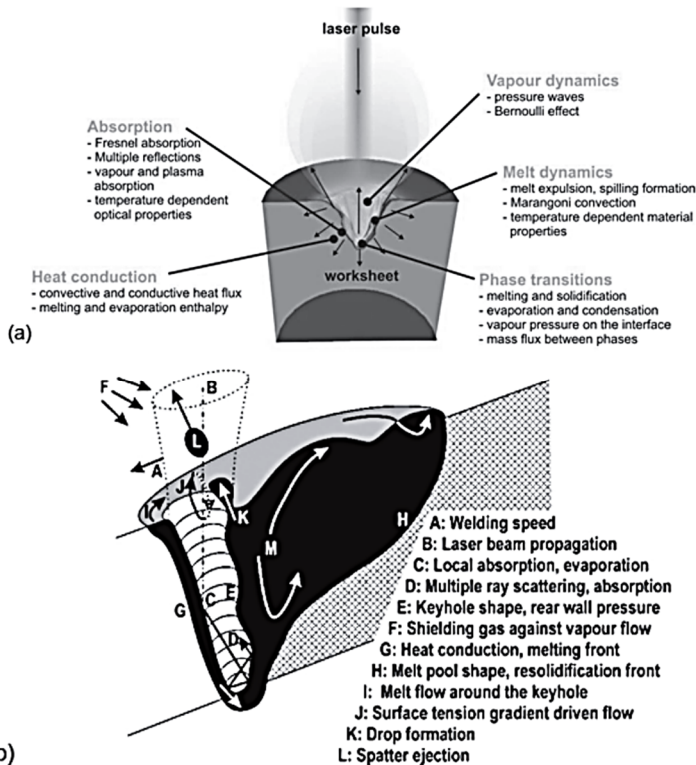
- Tidak ada kecacatan di dalam (pori, inklusi, fasa getas, retak, kekurangan fusi, dan sebagainya)
 - Tidak ada kecacatan di permukaan (takik, dan sebagainya)
- Untuk mendapatkan kualitas yang baik dalam sebuah sambungan biasanya digunakan metode optimisasi. Beberapa parameter proses yang penting adalah :
- Kecepatan pengelasan
 - Daya input laser
 - Mode pengelasan
 - *Focussing, focal plane* dan parameter sinar laser
 - Iradiasi laser



-
- Desain sambungan dan preparasi permukaan material
 - Komposisi kimia material
 - Gas pelindung
 - Logam *filler* yang memungkinkan
 - Dan sebagainya

2.2.2 Permodelan Pengelasan Laser

Dua metode penelitian yang penting dalam mempelajari pengelasan laser adalah permodelan dengan matematika dan pencitraan kecepatan tinggi. Permodelan dan proses simulasi biasanya digunakan untuk mendapatkan informasi tentang pembelajaran yang sulit atau pembelajaran yang membutuhkan waktu lama jika dilakukan dengan metode eksperimen langsung. Pada permodelan pengelasan laser, mekanisme fisiknya dilakukan dengan persamaan matematika. Permodelan dapat meneliti pengelasan laser secara menyeluruh, termasuk di beberapa area penelitian (optik, termodinamika, dinamika fluida, kekuatan struktural, perpindahan permukaan, dan sebagainya), atau sangat fokus pada satu atau beberapa mekanisme saja. Gambar 2.5 mengilustrasikan mekanisme penting dalam proses yang kompleks saat pengelasan laser metode *keyhole*.



Gambar 2. 5 Ilustrasi Mekanisme Pengelasan Laser Keyhole: (a) Keyhole dilihat dari depan, (b) Keyhole dilihat dari bagian lasan yang panjang (Sundqvist, 2015)

Model sederhana dari pengelasan laser biasanya hanya mempertimbangkan persamaan konduksi panas, yang dapat ditulis pada bentuk umum :

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \nabla^2 T = 0 \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana α adalah difusifitas termal yang dijelaskan dengan $\alpha = \kappa / (\rho c_p)$, κ adalah konduktifitas termal, ρ adalah densitas masa dan c_p



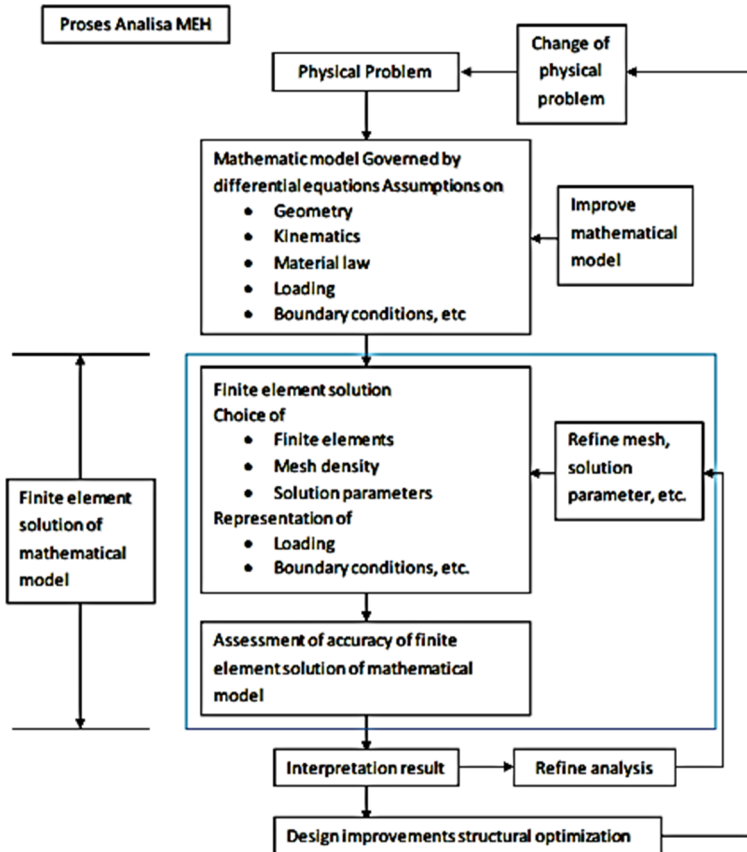
adalah kalor jenis. $T(x,y,z;t)$ disini dijelaskan dengan daerah temperatur pada ruang dan waktu.

2.3 Teori Optimisasi

Teori Optimisasi adalah ilmu yang bisa digunakan untuk mengambil keputusan dalam sebuah permasalahan, baik dalam bidang teknik atau bidang ekonomi. Pengambilan keputusan dilakukan dengan menganalisa beberapa variasi pilihan permasalahan. Pilihan ini ditentukan oleh keinginan kita untuk mendapatkan keputusan yang terbaik. Pilihan terbaik dideskripsikan dengan fungsi yang objektif atau indeks performa. Area optimisasi diterima diberbagai bidang karena peningkatan kemampuan teknologi komputer terus berkembang, termasuk pengguna *software* yang semakin handal, kecepatan yang tinggi dan prosesor yang paralel, dan semakin banyak jaringan buatan yang mendukung. Salah satu contoh *software* optimisasi adalah Optimization Toolbox milik Minitab¹⁷.

Bidang optimisasi aktif digunakan dalam penelitian-penelitian beberapa tahun belakangan ini. Berbagai macam pendekatan untuk teori optimisasi banyak diusulkan. optimisasi juga mendiskusikan algoritma yang berhubungan dengan permasalahan, topik yang penting untuk ditingkatkan dan berbagai studi yang kompleks lainnya. Sehingga optimisasi dalam diaplikasikan dalam segala bidang permasalahan yang membutuhkan pemecahan masalah yang optimal.

1.4 Metode Elemen Hingga



Gambar 2. 6 Proses Pengerjaan pada Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik dengan basis komputasi untuk memecahkan persoalan pada bidang *engineering*. Geometri akan dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil di mana masing-masing elemen *node* yang digunakan untuk mewakili nilai variabel (contohnya, pada temperatur,



tegangan dan perpindahan panas) yang membawahi elemen fungsi interpolasi (disebut juga dengan fungsi aproksimasi). Persamaan matriks menjabarkan sifat-sifat setiap elemen. Hal tersebut ditentukan dengan menggunakan salah satu dari tiga pendekatan, yaitu : pendekatan langsung, pendekatan variasional, dan pendekatan *weight residual*. setiap persamaan matriks digabungkan untuk menemukan persamaan sistem secara keseluruhan. Nilai nodal dari variabel lapangan dimasukkan pada persamaan sistem. Nilai nodal yang tidak diketahui dari masalah akan diperoleh dengan menyelesaikan persamaan sistem. Masalah teknik yang umum dalam metode elemen hingga antara lain adalah : struktural, termal, aliran fluida, listrik, magnet, kebisingan akustik dan lain-lain.

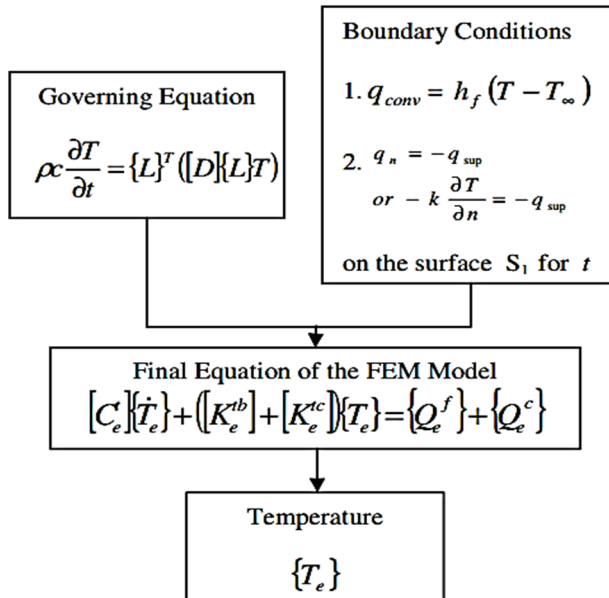
2.5 Distribusi Temperatur

Metode elemen hingga tiga dimensi digunakan untuk menganalisa perpindahan panas dan distribusi temperatur pada pengelasan laser. Dari studi literatur yang dilakukan didapatkan bahwa mekanisme perpindahan panas pada *molten pool* sangatlah kompleks. Berbagai macam sifat material logam pada kondisi cair juga dikembangkan. Oleh karena itu model konduksi tiga dimensi dikembangkan untuk menganalisa aliran panas dan distribusi temperatur pada seluruh bagian plat yang ingin teliti.

2.5.1 Model Termal

Pada model termal, diusahakan untuk mengakomodasi kondisi pengelasan sama seperti dengan yang sebenarnya. Asumsi pada pengelasan telah dibuat dalam penelitian yang dilakukan oleh Bhadra (2014) :

- Semua sifat *stainless steel* yang relevan dianggap sebagai fungsi temperatur
- Pendinginan konveksi *Linear Newtonian* dianggap berada di semua bagian kecuali pada area lasan
- Radiasi yang hilang juga termasuk dalam model termal ini.



Gambar 2. 7 Skema Model Termal pada Analisa Material Tiga Dimensi (Bhadra, 2014)

2.5.2 Model Sumber Panas

Sumber panas yang mempengaruhi distribusi panas disebabkan oleh laser sebagai *heat input*. Laser yang diinputkan memiliki efek yang sangat penting pada distribusi panas di sekitar area lasan. Area lasan adalah tempat dimana *fusion zone* (FZ) dan HAZ terbentuk. Untuk menganalisa aliran panas dari FZ dan HAZ, *heat input* dapat dijadikan sumber panas yang terkonsentrasi pada suatu titik tertentu. *Heat input* dan *welding speed* cukup digunakan untuk menentukan siklus termal.

Untuk distribusi panas yang bersifat volumetrik, distribusi Gaussian *ellipsoid* atau *ellipsoid* ganda adalah model sumber panas yang paling umum digunakan. Distribusi panas volumetrik



dalam sistem koordinat bergerak yang digunakan dalam penelitian ini diberikan dalam persamaan :

$$q = \frac{6\sqrt{3}}{\pi\sqrt{\pi}} \frac{\phi p}{dr^2} e^{-3\left(\frac{x}{r}\right)^3 - 3\left(\frac{y}{d}\right)^2 - 3\left(\frac{z-v_l t}{r}\right)^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana, ϕ koefisien absorpsi; p power laser (W); r jari-jari sinar laser pada permukaan yang difokuskan; v_l kecepatan laser; d parameter sumber panas yang bergantung pada dispersi titik *focal*.

Pada AWS *Welding Handbook Vol 1*, pengelasan las laser menggunakan *power (energy) density* sebagai inputnya yang diaplikasikan pada bagian *spot welding* :

$$PD = \frac{P}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana

- PD = Power density, W/m²;
- P = Input beam power, W;
- π = 3,1416; dan
- d = Ukuran titik focus laser, m.

2.6 Tegangan Termal Pengelasan

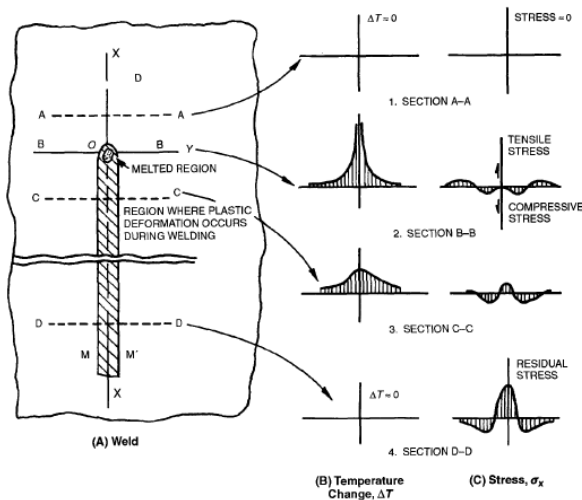
Selama proses pemanasan dalam pengelasan akan mengakibatkan suatu regangan. Tegangan akibat pemanasan ini dapat didiskripsikan dengan membagi daerah lasan menjadi beberapa buah potongan melintang sebagai berikut :

- A-A : Daerah yang belum tersentuh panas
- B-B : Daerah yang mencair tepat pada busur las
- C-C : Daerah terjadinya deformasi plastis
- D-D : Daerah yang sudah mengalami pendinginan

Bila pengelasan berjalan dari potongan D-D ke potongan B-B maka akan terjadi distribusi panas sepanjang pengelasan. Sesaat pengelasan sampai titik O maka setiap potongan pada alur pengelasan dapat dianalisa distribusi tegangannya. Besarnya tegangan yang terjadi karena adanya perubahan temperatur

selama proses pengelasan ditunjukkan oleh siklus termal terjadinya tegangan sisa.

Pada daerah dengan temperatur paling rendah (daerah A-A) tidak terjadi tegangan, sedangkan pada daerah dengan temperatur yang paling tinggi (daerah B-B) yaitu daerah yang mencair tepat pada garis lasan akan terjadi tegangan tekan (*compression*) sedangkan di sisi kanan dan sisi kiri dari garis lasan akan terjadi tegangan tarik (*tension*). Pada daerah dengan temperatur yang mulai menurun (daerah C-C) daerah garis lasan akan terjadi tegangan tarik dan pada daerah sisi kanan dan kirinya akan terjadi tegangan tekan. Demikian pula pada daerah D-D yaitu pada daerah yang sudah terjadi pendinginan dan temperatur sudah menurun disini akan terjadi tegangan tarik tepat pada daerah garis lasan dan kanan kiri dari garis lasan akan mengalami tegangan tekan. Tegangan tarik yang terjadi pada daerah D-D akan tetap tertanam pada material hasil lasan dan tinggal secara permanen sebagai residual stress dan lebih sering disebut tegangan sisa.



Gambar 2. 8 Distribusi Temperatur dan Tegangan Selama Pemanasan (AWS Vol 1, 2001)



2.7 Tegangan Sisa

Tegangan sisa dapat dihitung melalui besarnya regangan sisa yang terjadi selama pengelasan dengan menggunakan kaidah hukum Hooke. Untuk regangan sisa yang terjadi selama pengelasan dapat diukur dengan jalan perhitungan perubahan ukuran yang terjadi pada material yang disambung. Dari hukum Hooke jelas bahwa perubahan ukuran yang terjadi ini disebabkan oleh adanya regangan. Dengan diketahuinya regangan yang terjadi maka perhitungan besarnya tegangan dapat dihitung.

Untuk tegangan satu arah tegangan sisa yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan hukum Hooke dibawah ini :

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \dots \dots \dots (2.4)$$

dimana :

- σ = Tegangan sisa yang terjadi, Pa;
- E = *Modulus elastic*, Pa;
- l = Panjang mula-mula, m; dan
- Δl = Perubahan panjang yang terjadi, m.

Pada perhitungan tegangan sisa untuk dua dimensi dapat digunakan persamaan sebagai berikut (Wirjosumarto dan Okumura, 1996) :

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \dots \dots \dots (2.6)$$

dimana :

- σ_x = Tegangan tegak lurus sumbu las, Pa;
- σ_y = Tegangan searah sumbu las, Pa;
- ϵ_y = Regangan tegak lurus sumbu las; dan
- ϵ_y = Regangan searah sumbu las.

Sedangkan tegangan sisa karena pengaruh pemanasan dapat dihitung dengan menggunakan hubungan anatara tegangan regangan yang disebabkan oleh panas (Mahrlein, 1999) :



$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\sigma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana :

- σ = Tegangan sisa, Pa;
- E = Modulus elastic, Pa;
- L_0 = Panjang mula – mula, m;
- Δl = Perubahan panjang, m;
- ΔT = Perubahan temperatur, K; dan
- α = Koefisien muai panjang, $\frac{1}{K}$.

2.8 Material Esshete 1250

Esshete 1250 adalah material steel austenitik kromium-nikel dengan nomer UNS S21500 yang memiliki kekuatan pada temperatur tinggi dan resistansi yang baik. Metode pengelasan pada Esshete 1250 yang selama ini digunakan adalah *metal-arc welding* dengan elektroda pelindung dan *gas shielded arc welding* dengan metode TIG yang dijadikan pilihan utama. Pengelasan yang digunakan pada Esshete 1250 lebih baik dilakukan dengan *heat input* yang rendah sehingga sambungan lasan dapat dikontrol dan hasilnya masih baik. Sering terjadi tegangan sisa yang mengganggu hasil lasan Esshete 1250. Esshete 1250 memiliki *creep strength* yang tinggi, resistansi yang baik pada uap dan gas atmosfer membuat material ini sangat baik digunakan pada *coal-fired boilers*. Esshete 1250 telah dikembangkan di Inggris pada tahun 1960an, dan sebagian besar digunakan di industri Inggris pada boiler 500 dan 660 MW. Namun aplikasi utama Esshete 1250 adalah pada *superheater* dan *reheater* yang beroperasi pada temperatur 570° C, dengan tekanan 170 bar (pada *superheater*) dan 40 bar (pada *reheater*).



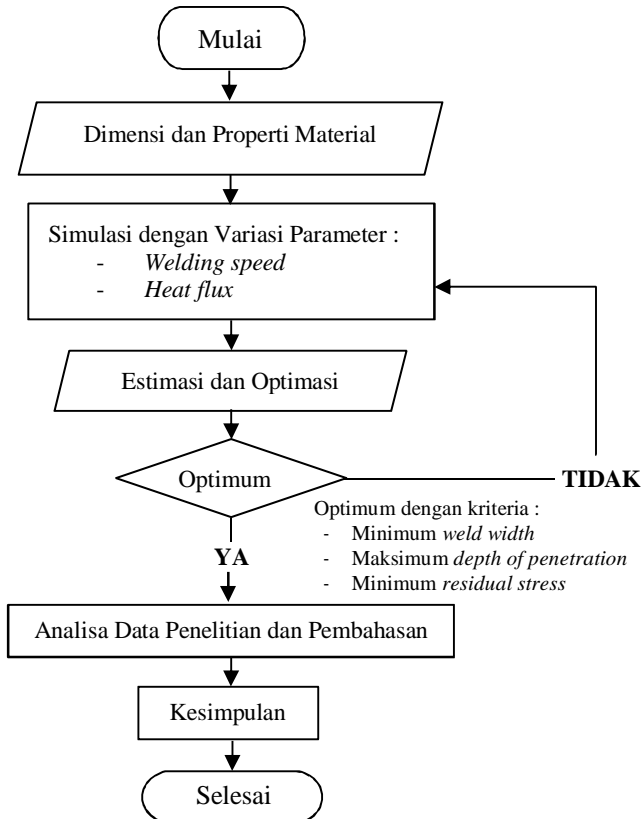
Tabel 2.2 Standar Komposisi Kimia Material Esshete 1250 menurut ASTM A213

Unsur	Komposisi (%)
	Esshete 1250
C	0.06-0.15
Mn	5.5-7.0
P	0.045
S	0.03
Si	0.20-1.00
Cr	14.0-16.0
Ni	9.0-11.0
Mo	0.80-1.20
Nb	0.75-1.25
B	0.003-0.009

BAB III METODOLOGI

3.1 Metode Penelitian

Dalam penelitian terdapat beberapa langkah kegiatan yang dilakukan untuk mencapai hasil yang diinginkan. Di bawah ini adalah diagram alir penelitian yang akan dilakukan :



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Spesifikasi Material dan Parameter *Laser Welding*

Dalam penelitian material yang diteliti adalah material Esshete 1250. Material memiliki komposisi dan properti yang akan dijadikan acuan dalam membuat geometri percobaan. Parameter yang akan digunakan dalam percobaan adalah *heat flux* dan *welding speed*. Kemudian yang nantinya akan dilihat hasilnya adalah kedalaman penetrasi, lebar lasan, dan tegangan sisa Esshete 1250.

3.2.1 Material Pengelasan

Pada penelitian ini, material yang digunakan dalam proses pengelasan adalah Esshete 1250. Data-data sifat material berasal dari datasheet Sandvik (2017), North American Stainless dengan Standar UNS : S 21500, Esshete 1250, dan ASM Handbook Vol 1.

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Esshete 1250 (Sandvik, 2017)

Unsur	Komposisi (%)
C	0.1
Si	0.5
Mn	6.3
P	≤ 0.035
S	≤ 0.015
Cr	15
Ni	9.5
Mo	1.0
V	0.3
Nb	1.0
B	0.005

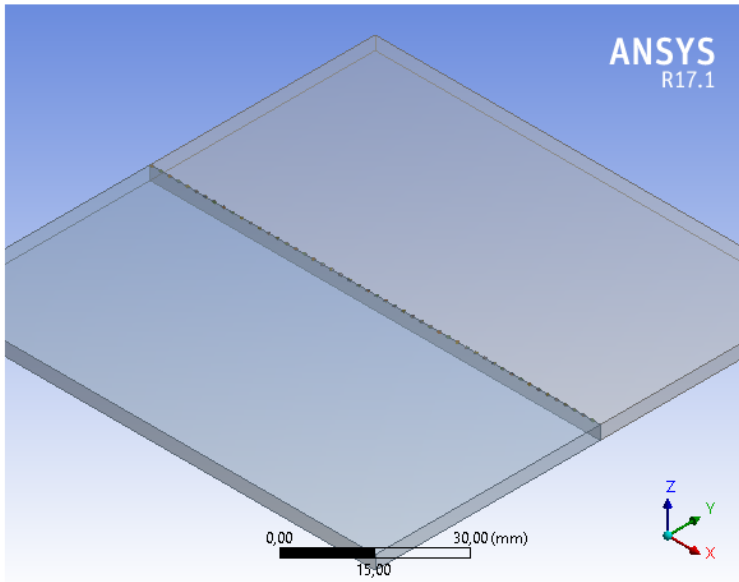


Tabel 3.2 Properti Material Esshete 1250 (Sandvik, 2017)

Temperatur (°C)	Densitas (Kg/m³)	Konduktivitas (W/m·K)	Kalor Jenis (J/Kg·K)
20	7960	12.69	490
100	7930	13.93	508
200	7890	15.48	532
300	7850	17.03	555
400	7810	18.58	580
500	7770	20.13	603
600	7730	21.68	627
700	7680	23.23	650
800	7640	24.78	650
900	7600	26.33	650
1000	7550	27.88	650
1100	7550	29.43	650
1200	7550	30.98	650
1300	7550	32.53	650
1400	7550	34.08	650

3.2.2 Geometri Spesimen

Geometri yang digunakan dalam penelitian ini adalah material Esshete dengan ukuran 50 mm x 100 mm x 3 mm sebanyak dua material yang ditempel. Bentuk input las berupa setengah bola sebanyak 50 titik.



Gambar 3. 2 Dimensi Material Permodelan



3.2.3 Parameter *Laser Welding*

Adapun parameter yang dipakai dalam penelitian kali ini dibagi menjadi dua parameter yaitu *heat flux* (dari laser power input) dan *welding speed* disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Parameter Laser Welding

Parameter	Min	Max
<i>Laser power</i> (W)	2000	2750
<i>Welding speed</i> (m/menit)	2.5	3.5

3.3 Peralatan Penelitian

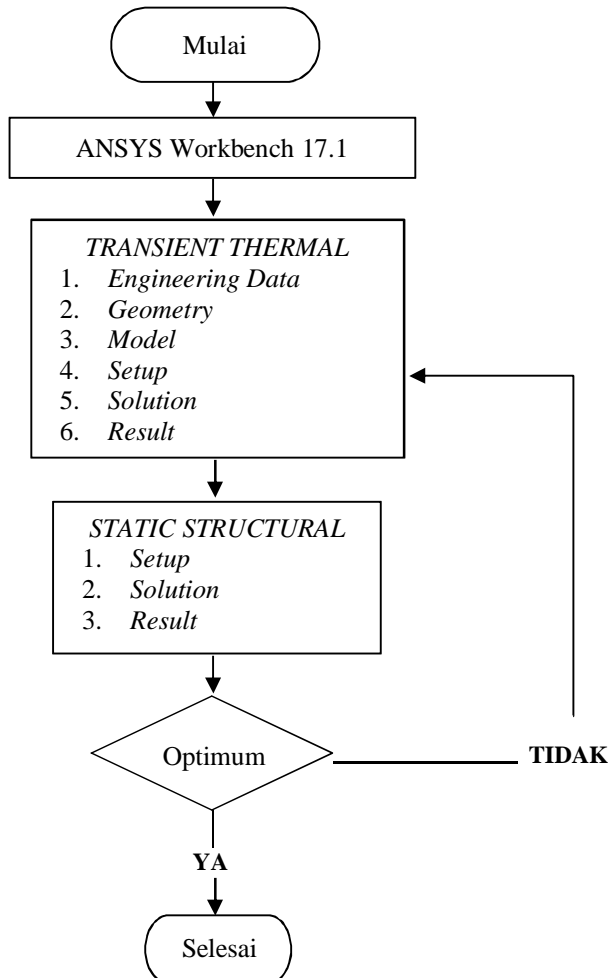
Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa :

1. ANSYS Workbench 17.0 *Transient Thermal* dan *Static Structural* merupakan salah satu *software* yang mampu menyelesaikan persoalan elemen hingga dari permodelan dengan keakuratan yang cukup tinggi. Dalam penelitian ini, ANSYS digunakan untuk membuat permodelan spesimen dan memodelkan simulasi *laser welding*. ANSYS digunakan untuk mengetahui lebar lasan, kedalaman penetrasi, dan tegangan sisa.
2. Minitab17 adalah program komputer yang dirancang untuk melakukan pengolahan statistik. Minitab mengkombinasikan kemudahan penggunaan layaknya Microsoft Excel dengan kemampuannya melakukan analisis statisti yang kompleks. Minitab melakukan analisa terhadap hasil simulasi ANSYS untuk mendapatkan nilai optimal sesuai parameter yang telah ditentukan.



3.4 Alur Permodelan dengan Software

Adapun diagram alir permodelan *laser welding* Esshete 1250 dengan menggunakan ANSYS Workbench 17.1 dapat dilihat pada Gambar 3.3.



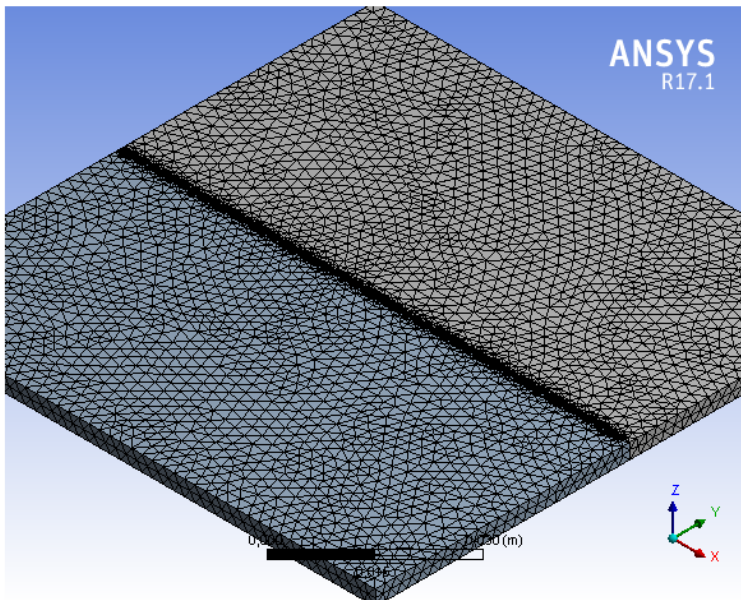
Gambar 3. 3 Diagram Alir Permodelan Laser Welding

3.4.1 Permodelan Spesimen

Spesimen yang digunakan adalah material Esshete 1250 yang diberi *constrain* dibagian bawahnya sebagai pengganti magnet pada kondisi pengelasan laser yang sebenarnya.

3.4.2 Meshing

Meshing dilakukan menggunakan *curvature size function*, *high smoothing*, dan *fast transition*. Minimal ukuran elemen yang digunakan sebesar 0,1 mm yang menggunakan titik las sebagai pusat *meshing*.



Gambar 3. 4 Hasil Meshing pada Spesimen

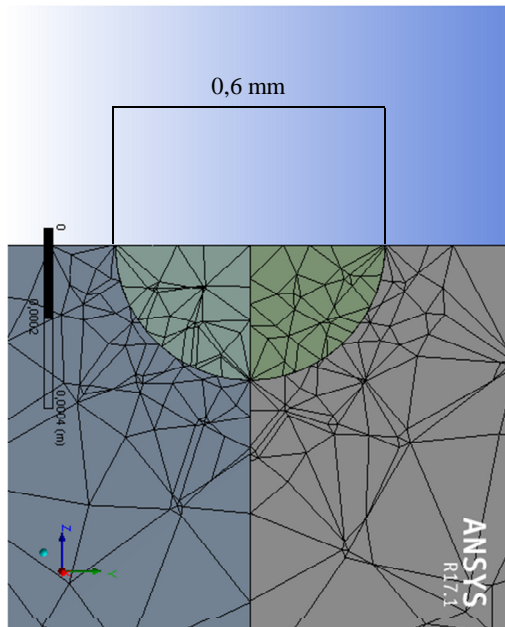


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Permodelan

Simulasi ini dilakukan pada geometri pengelasan *butt joint* dengan ukuran specimen 100 mm x 200 mm x 3 mm. pengelasan yang dilakukan adalah *fiber laser welding* dengan diameter *spot welding* sebesar 0,6 mm. Penelitian dilakukan dengan berbagai parameter untuk didapatkan nilai optimisasi dengan nilai lebar lasan yang minimum, kedalaman penetrasi yang maksimum, dan tegangan sisa yang minimum.



Gambar 4. 1 Geometri *Weld Spot*

Pada analisa termal, input yang digunakan adalah *heat flux* yang didapatkan dari power input laser yang diaplikasikan pada setiap titik las dan kecepatan las. Pada analisa ini, material berada



pada temperatur awal 300 K dan perambatan konveksi sebesar 50 W/m².K. Kemudian bagian bawah material diberi heat dengan *perfectly insulated* karena bagian bawahnya tidak terkena udara. Output dari analisa termal ini adalah lebar lasan dan kedalaman penetrasi pengelasan yang didapatkan dari distribusi temperatur pada temperatur diatas 1400 °C (temperatur fusi material Essete 1250).

Pada analisa struktural, input yang digunakan adalah temeperatur yang didapatkan dari analisa termal sebelumnya. Input dilakukan pada keseluruhan bagian dari spesimen pengelasan. Output yang diinginkan pada analisa struktural ini adalah tegangan sisa berupa *residual stress* material setelah pengelasan yang dilakukan.

4.2 Perhitungan Pembebanan

4.2.1 Pembebanan Termal

Pembebanan termal pada ANSYS Workbench diaplikasikan pada setiap titik pada dimensi pengelasan (sebanyak 50 titik yang berada pada koordinat yang berbeda). Titik-titik ini berbentuk setengah bola sebagai pengganti titik laser yang memiliki diameter 0,6 mm. Diameter ini disesuaikan dengan ukuran kawat laser yang sebenarnya di lapangan. Luas permukaan setengah bola ini adalah $2,826 \times 10^{-7} \text{ m}^2$.

Heat flux sebagai heat input pengelasan dihitung menggunakan persamaan (2.3) dimana P adalah power input las (W) seperti yang diuraikan pada Tabel 4.1 dan d adalah diameter titik fokus las dan didapatkan *heat flux* sesuai dengan Tabel 4.2. Untuk mendapatkan hasil heat flux yang sesuai dengan keadaan yang sebenarnya, persamaan (2.3) harus dikalikan dengan efisiensi las yang biasanya besarnya 90 % sampai 95 %. Pada perhitungan *heat flux* Tabel 4.2, efisiensi dianggap 100 % sehingga tidak ada power input laser yang tidak digunakan. Power yang dikeluarkan oleh laser adalah power output laser yang besarnya tidak sama dengan power input yang dikeluarkan oleh alat *laser beam welding*. Karena laser adalah sistem pengelasan yang paling tidak efisien, sehingga untuk



menghasilkan power laser sebesar 2000 W bisa dibutuhkan konsumsi arus dan voltase sebesar 20000 W. Hal ini dikarenakan untuk menghidupkan *laser beam* dibutuhkan tenaga yang lebih besar.

Tabel 4. 1 Parameter Pengelasan pada Setiap Case

Case	Welding Speed		Power Input (W)	Waktu (s)	Heat Flux (W/m ²)
	(m/min)	(m/s)			
1	2,5	0,0417	2000	2,4	7077140835
2			2250	2,4	7961783439
3			2500	2,4	8846426044
4			2750	2,4	9731068648
5	3	0,0500	2000	2	7077140835
6			2250	2	7961783439
7			2500	2	8846426044
8			2750	2	9731068648
9	3,5	0,0583	2000	1,7143	7077140835
10			2250	1,7143	7961783439
11			2500	1,7143	8846426044
12			2750	1,7143	9731068648

Pembebanan yang diberikan pada analisa termal dilakukan secara transient yaitu dengan memasukkan variabel waktu pada 50 titik yang berbeda sepanjang sambungan *butt joint* sehingga akan didapatkan output distribusi temperatur yang berbeda pada waktu yang berbeda untuk setiap titik yang ada. Waktu dari setiap titik berbeda sesuai dengan besar koordinat titik terhadap sumbu geometri pengelasan. Titik yang berada pada koordinat nol permukaan geometri las memiliki waktu pembebanan *heat flux* sebesar $t_1 = \frac{d_1}{v}$ dimana d_1 adalah jarak antara titik pertama dengan tepi geometri (dalam satuan m) dan v adalah *welding speed* pengelasan (dalam satuan m/s). Titik kedua yang berada pada koordinat yang berbeda dapat dihitung dengan rumusan $t_2 = \frac{d_2}{v} + t_1$ dimana d_2 adalah jarak titik kedua dengan titik pertama



(dalam satuan m) dan v adalah *welding speed* pengelasan (dalam satuan m/min). Waktu pembebanan thermal pada titik ketiga dan seterusnya akan sama perhitungannya dengan perhitungan titik kedua terhadap titik pertama. Sehingga didapatkan waktu pembebanan thermal total sesuai dengan kecepatan yang ditetapkan. Waktu pembebanan thermal ini sangat penting untuk diperhatikan. Karena waktu pembebanan yang tidak sesuai akan menghasilkan distribusi temperatur yang tidak sesuai dengan yang dibutuhkan.

Pembebanan dilakukan pada setiap titik dengan dua waktu yang berbeda dalam 1 titik. Waktu pertama adalah waktu pemanasan logam dimana terdapat *heat flux* yang sesuai dengan Tabel 4.2. dan waktu kedua adalah waktu pada step selanjutnya yang tidak memiliki input *heat flux* (input *heat flux* memiliki nilai nol). Hal ini memiliki tujuan untuk melakukan pendinginan setelah pemanasan sehingga didapatkan daerah pelelehan logam yang sesuai dengan keadaan pengelasan yang sebenarnya. Pembebanan dengan dua waktu yang berbeda ini dilakukan terhadap semua titik. Titik pertama akan mendapatkan pembebanan *heat flux* hanya pada step pertama dan selain step pertama memiliki nilai *heat flux* nol. Titik kedua akan mendapatkan pembebanan *heat flux* hanya pada step kedua dan selain step kedua memiliki nilai *heat flux* nol, dan seterusnya hingga step terakhir.

Pembebanan pada ANSYS Workbench *Transient Thermal* akan menghitung semua step yang aktif pada *tabular data step*. Oleh karena itu, *load step* selain pada step yang dituju haruslah dihapus dengan cara *dideactive*. Hal ini bertujuan agar *software* tidak mengkalkulasi pembebanan *heat flux* pada step yang *dideactive* tersebut. Pemberikan pembebanan *heat flux* dengan nilai nol tidaklah sama dengan menghapus *load step* tersebut. Penghapusan *load step* memiliki fungsi yang sama dengan *deactive load step*. Sementara untuk menjalankan pembebanan termal sebagai pengelasan, pengaturan yang digunakan adalah menonaktifkan *auto time stepping*. Step berjalan bukan dari



waktu step namun dari substep yang ada. Pengaturan selanjutnya adalah dengan mengaktifkan integrasi waktu.

Pada kondisi pengelasan, konveksi sebesar $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ diaplikasikan terhadap semua *load step* selama proses pengelasan berjalan. Konveksi diaplikasikan pada seluruh permukaan geometri, sebanyak 108 permukaan (selain bagian bawah geometri karena bagian bawah geometri dianggap menempel pada sebuah meja kerja pengelasan). Radiasi dianggap normal pada temperatur ruang dan diaplikasikan terhadap seluruh permukaan geometri selain permukaan bagian bawah. Permukaan bagian bawah diberi pembebanan termal berupa *heat flow perfectly insulated* karena tidak ada panas yang mengalir baik dari geometri pengelasan ke meja kerja maupun sebaliknya.

4.2.2 Pembebanan Struktural

Pada analisa struktural input pembebanan yang digunakan adalah output dari analisa termal yang telah dilakukan sebelumnya distribusi temperatur dan pemberian *constrain* berupa *fix support* pada bagian bawah spesimen sebagai *boundary condition*. Analisa dilakukan hanya menggunakan 1 step pada proses *transient structural* dengan waktu yang sama dengan waktu yang dibutuhkan pada proses pembebanan termal. Pembebanan struktural bertujuan untuk mengetahui tegangan sisa dari proses pengelasan laser. Tegangan sisa dalam simulasi berupa *equivalent stress* (*Von Misses*).

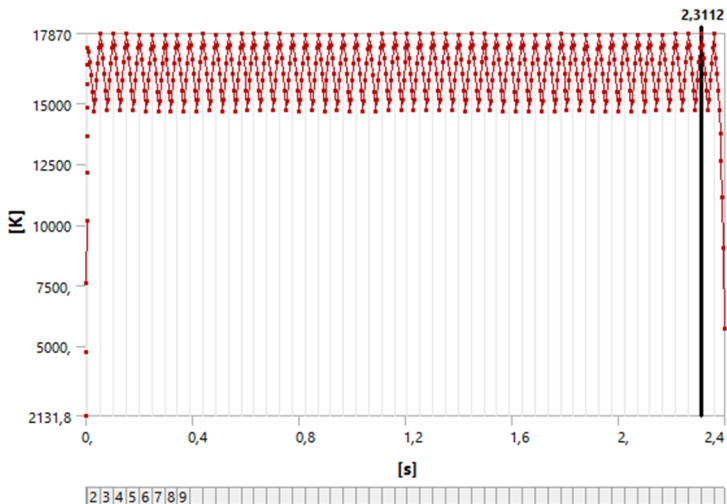
4.3 Hasil Penelitian (Permodelan)

4.3.1 Termal

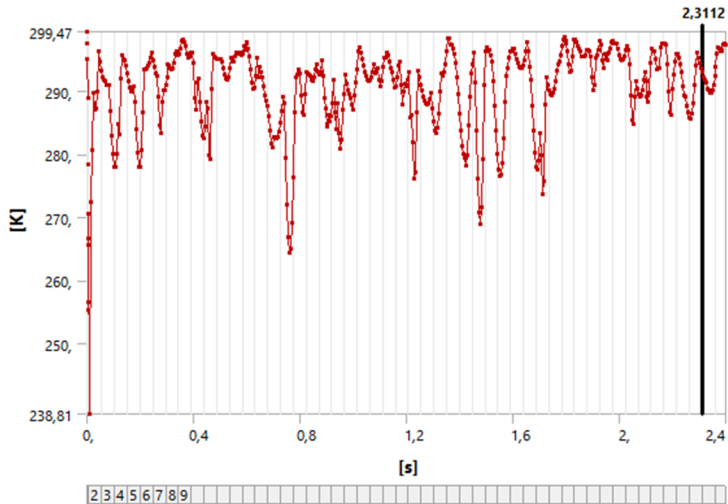
Hasil analisa simulasi *transient thermal* pada pengelasan laser ini adalah berupa distribusi temperatur yang menggambarkan daerah lasan (lebar lasan, kedalaman penetrasi). Distribusi temperatur pada hasil pengelasan berupa rentang temperatur *global maximum temperature* dan *global minimum temperature*. *Global maximum temperature* adalah temperatur maksimum yang dihasilkan oleh setiap titik pada setiap pembebanan *heat flux* dari semua proses. *Global minimum*



temperatur adalah temperatur minimum yang dihasilkan oleh setiap titik pada setiap pembebanan *heat flux* dari semua proses. Distribusi temperatur ini ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 untuk memperjelas hasilnya. Temperatur tertinggi pada pengelasan berada pada *weld pool* kemudian semakin dingin ke arah daerah HAZ kemudian kondisi yang memiliki temperatur paling rendah adalah pada bagian *base metal*.

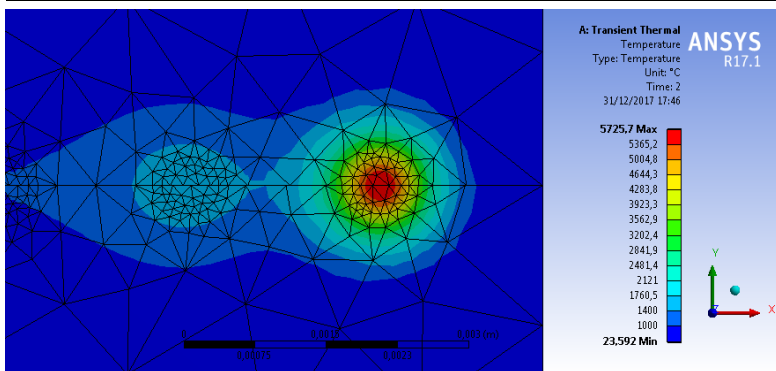


Gambar 4. 2 Temperatur Global Maksimum

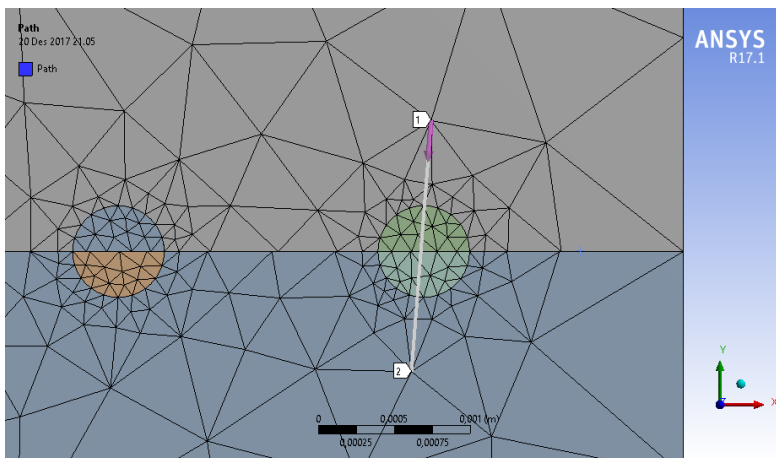


Gambar 4. 3 Temperatur Global Minimum

Pengukuran lebar lasan dan kedalaman penetrasi dihitung dari daerah yang menunjukkan temperatur diatas 1400 °C (temperatur minimum untuk melelehkan material Esshete 1250). Pengukuran dilakukan dengan menghitung selisih ketinggian batas temperatur 1400 °C pada Sumbu Y geometri. Posisi koordinat setiap elemen diketahui dengan mengaktifkan *construction geometry* kemudian menginput jenis *construction* berupa *path*. *Path* akan membantu mengetahui koordinat elemen terdekat dari batas temperatur ini.



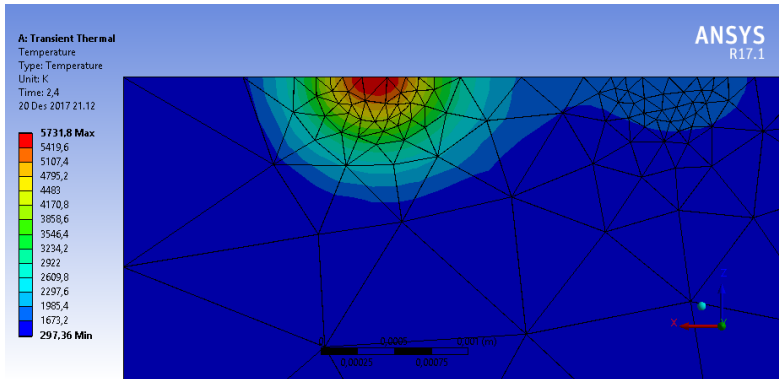
Gambar 4. 4 Distribusi Temperatur untuk Menghitung Lebar Lasan



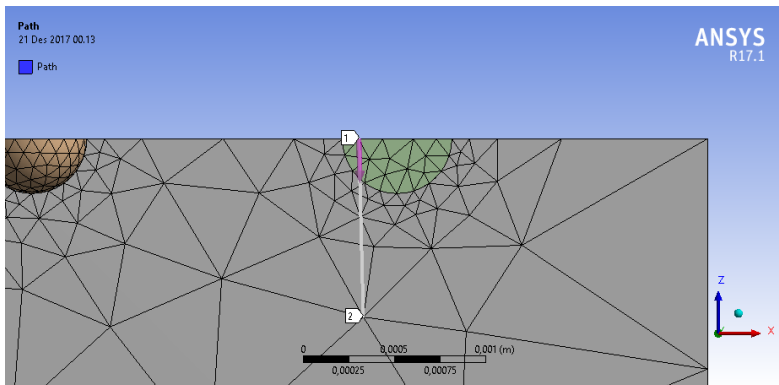
Gambar 4. 5 Perbedaan Koordinat Antar 2 Node pada Sumbu Y

Pengukuran lebar pengelasan pada setiap simulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dilakukan dengan menghitung selisih dari koordinat node yang paling dekat dengan temperatur melting material Esshete 1250. Dengan menghitung selisih koordinat dalam sumbu Y ini, maka akan didapatkan hasil yang lebih akurat. Hasil yang lebih akurat juga akan didapatkan apabila *meshing* yang dilakukan pada material semakin halus sehingga

jarak antara node dengan batas temperatur melting material Esshete 1250 semakin dekat.



Gambar 4. 6 Distribusi Temperatur untuk Menghitung Kedalaman Penetrasi



Gambar 4. 7 Perbedaan Koordinat Antar 2 Node pada Sumbu Z

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat respon temperatur yang dijadikan acuan untuk menghitung kedalaman penetrasi pengelasan laser welding. Titik pengelasan berbentuk setengah bola sehingga bentuk penetrasi yang terjadi pada hasil simulasi seperti setengah lingkaran. Pengukuran yang dilakukan pada

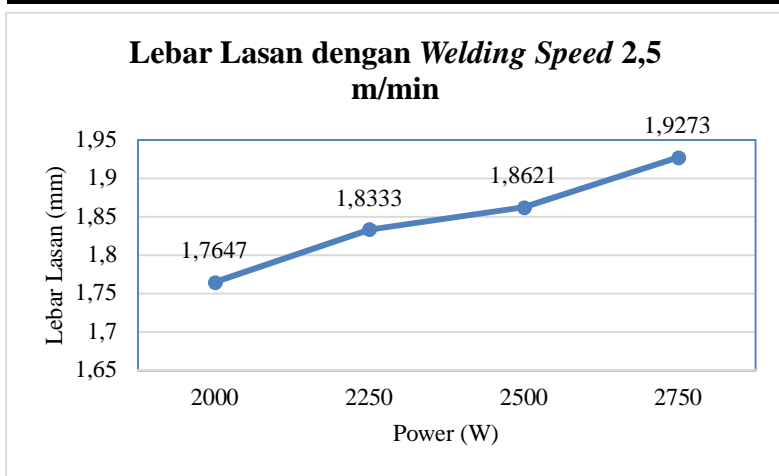


kedalaman penetrasi sama dengan pengukuran yang dilakukan pada lebar pengelasan. Hanya saja yang dilihat adalah selisih koordinat node dalam Sumbu Z seperti yang dijelaskan pada Gambar 4.7.

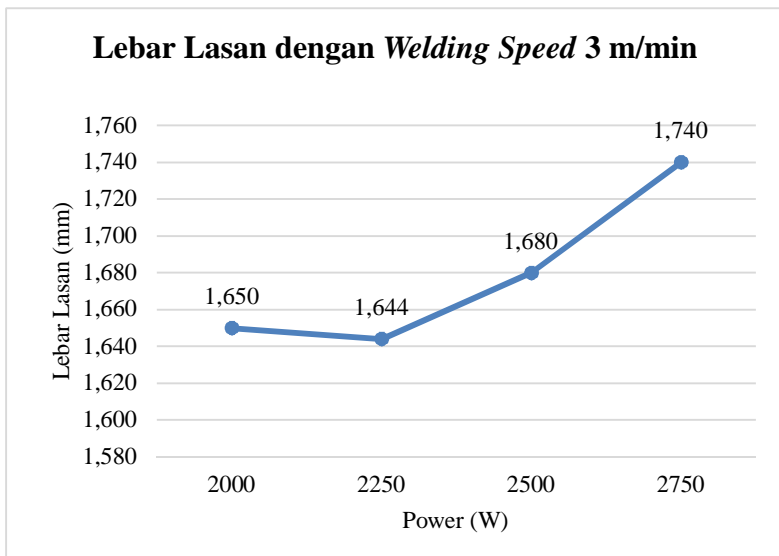
Tabel 4. 2 Ukuran Weld Bead dari Distribusi Temperatur

<i>Case</i>	Welding Speed (m/min)	Power Input (W)	Lebar Lasan (mm)	Kedalaman Penetrasi (mm)
1	2,5	2000	1,7647	0,88
2		2250	1,8333	0,8842
3		2500	1,8621	0,92
4		2750	1,9273	0,9
5	3	2000	1,650	0,78
6		2250	1,644	0,8308
7		2500	1,680	0,8432
8		2750	1,740	0,8714
9	3,5	2000	1,6098	0,7692
10		2250	1,6833	0,7941
11		2500	1,6769	0,7875
12		2750	1,695	0,8211

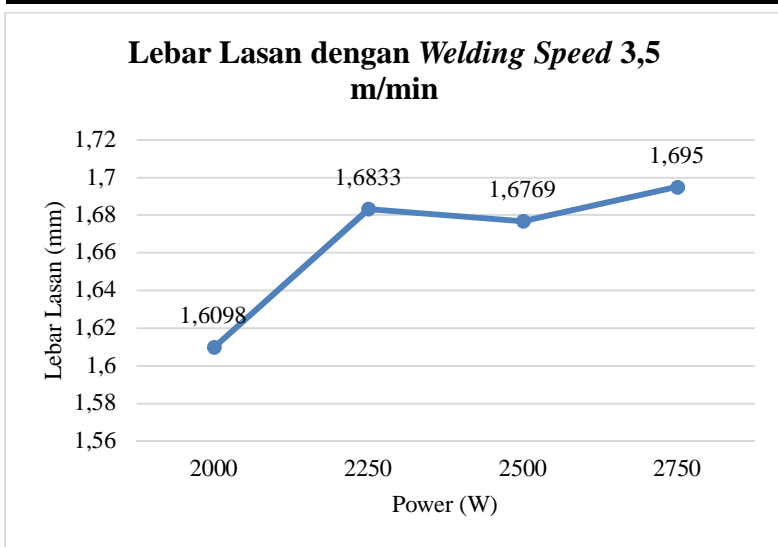
Tabel 4.3 menggambarkan hasil simulasi yang dilakukan sebanyak 12 kali simulasi. Simulasi dilakukan pada 3 *welding speed* yang berbeda dan dengan masing-masing 4 power input yang berbeda-beda. Setiap simulasi dengan *welding speed* dan power input yang berbeda menghasilkan nilai lebar lasan dan kedalaman penetrasi yang berbeda-beda. Lebar lasan dari 12 simulasi memiliki rata-rata sebesar 1,730574 mm dan rata-rata kedalaman penetrasi sebesar 0,8466875 mm.



Gambar 4. 8 Lebar Lasan pada *Welding Speed* 2,5 m/min



Gambar 4. 9 Lebar Lasan pada *Welding Speed* 3 m/min



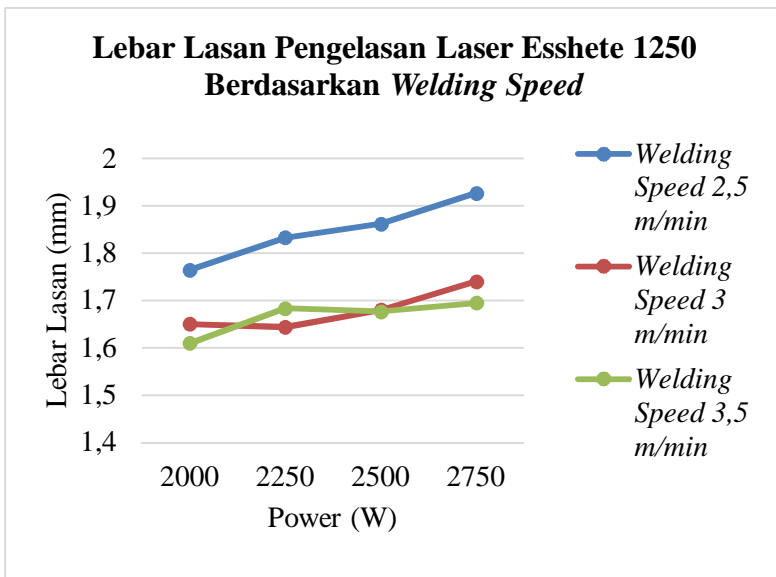
Gambar 4. 10 Lebar Lasan pada *Welding Speed* 3,5 m/min

Pada Gambar 4.9 dapat dilihat lebar lasan pada *welding speed* 3 m/min dengan beberapa power yang berbeda-beda. Pada power input sebesar 2000 W dihasilkan lebar lasan sebesar 1,650 mm, pada power input sebesar 2250 W dihasilkan lebar lasan sebesar 1,644 mm, pada power input sebesar 2500 W dihasilkan lebar lasan 1,680 mm, dan dengan power input 2750 W dihasilkan lebar lasan 1,74 mm. Dari beberapa power input didapatkan nilai lebar lasan yang sedikit turun dari power 2000 W ke power 2250 W. Kemudian lebar lasan meningkat dari power 2250 W sampai 2750 W. Penurunan lebar lasan pada power input 2000 W menuju power input 2250 W terjadi karena adanya pendekatan nilai penghitungan koordinat node yang kurang akurat yang disebabkan oleh kurang halusness *meshing*. Namun perbedaan angkanya sangat kecil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada *welding speed* 3 m/min, lebar lasan meningkat seiring dengan bertambahnya power input laser.

Pada Gambar 4.10 dapat dilihat lebar lasan pada *welding speed* 3,5 m/min dengan beberapa power yang berbeda-beda.



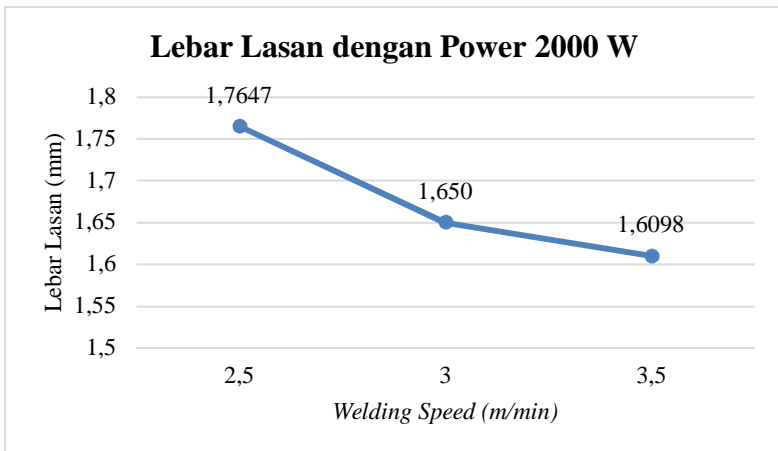
Pada power input sebesar 2000 W dihasilkan lebar lasan sebesar 1,6098 mm, power input 2250 W dihasilkan lebar lasan sebesar 1,6833 mm, power input 2500 W dihasilkan lebar lasan sebesar 1,6769 mm, dan pada power input 2750 W dihasilkan lebar lasan sebesar 1,695. Lebar lasan mengalami sedikit penurunan pada power 2500 W namun tidak signifikan karena penurunannya hanya sedikit. Oleh karena itu, lebar lasan pada *welding speed* 3,5 m/min, lebar lasan meningkat seiring dengan bertambahnya input laser.



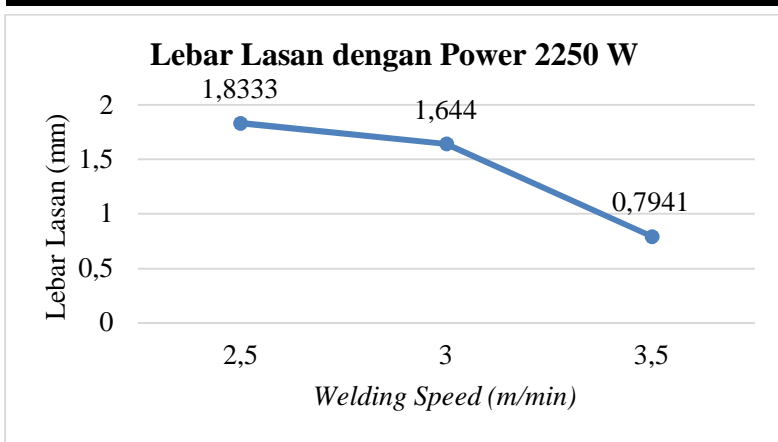
Gambar 4. 11 Lebar Lasan Pengelasan Laser Esshete 1250
Berdasarkan *Welding Speed*

Dapat dilihat pada Gambar 4.11 bahwa pada pengelasan laser dengan *welding speed* 2,5 m/min, 3 m/min, dan 3,5 m/min memiliki kenaikan lebar lasan seiring dengan kenaikan power input laser. Semakin besar power input laser, maka akan semakin besar *heat flux* yang diterima oleh masing-masing titik las laser. Semakin besar *heat flux* yang diterima oleh titik-titik las

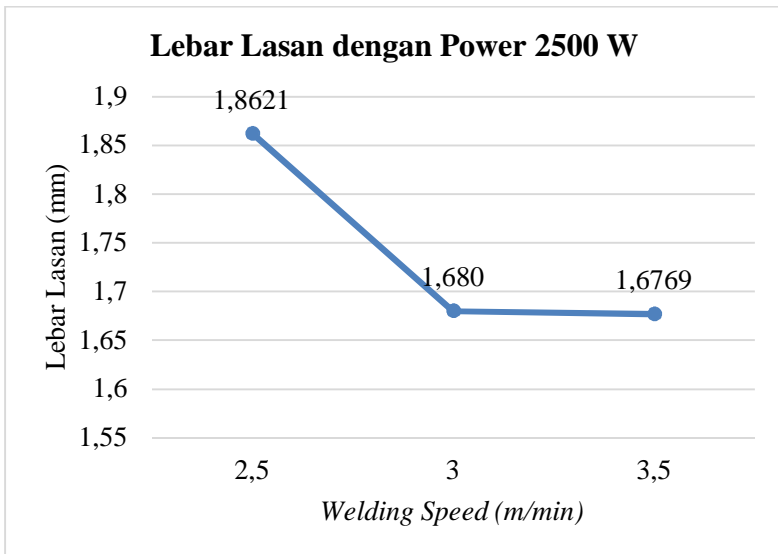
laser, maka akan semakin lebar distribusi temperatur yang diterima oleh *base material*. Temperatur yang mencapai titik fusi material akan menimbulkan daerah *Heat Affected Zone*. Hasil pengelasan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Mutiara (1998) dimana arus las berpengaruh pada proses pelelehan dan penyambungan logam. Semakin besar arus yang diinput pada pengelasan, maka akan semakin cepat pula proses pelelehan dan penyambungan yang terjadi. Namun semakin besar arus yang diinput pada sebuah material logam, mengakibatkan semakin lebarnya daerah HAZ. Sebaliknya, semakin kecil power yang diinput pada pengelasan laser, maka akan semakin kecil lebar HAZ yang dihasilkan oleh material itu. Hal ini mengakibatkan material membutuhkan waktu yang lebih lama untuk dilelehkan. Begitu juga Jiang (2016) yang melakukan simulasi pengelasan laser pada material stainless steel 316 L dengan power input 2000 W sampai 3500 W dan *welding speed* 2,5 m/min sampai 3,5 m/min dan dihasilkan lebar lasan yang meningkat pada power input yang semakin besar.



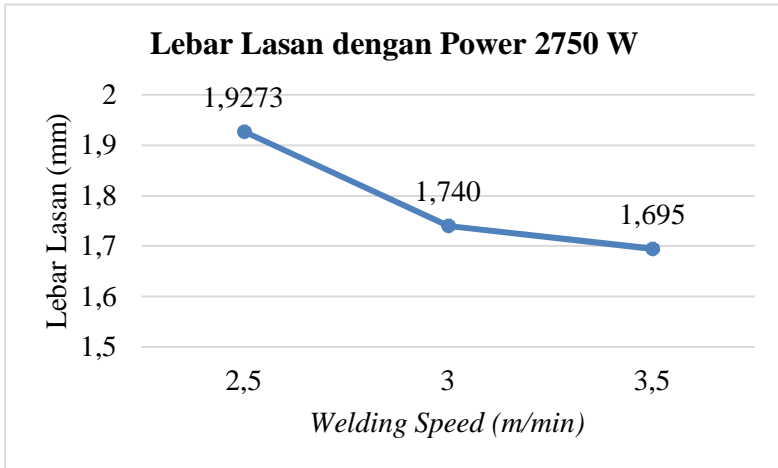
Gambar 4. 12 Lebar Lasan dengan Power 2000 W



Gambar 4. 13 Lebar Lasan dengan Power 2250 W

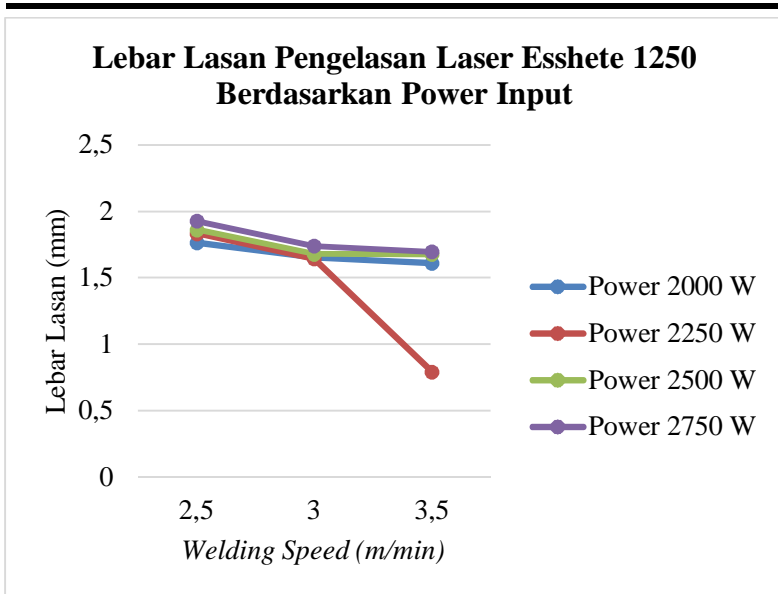


Gambar 4. 14 Lebar Lasan dengan Power 2500 W



Gambar 4. 15 Lebar Lasan dengan Power 2750 W

Pada Gambar 4.12 dapat dilihat dengan power 2000 W akan didapatkan lebar lasan 1,7647 mm pada *welding speed* 2,5 m/min, lebar lasan 1,65 mm pada *welding speed* 3 m/min, dan lebar lasan 1,6098 mm pada *welding speed* 3,5 m/min. Pada Gambar 4.13 dapat dilihat dengan power 2250 W akan didapat lebar lasan 1,8333 mm pada *welding speed* 2,5 m/min, lebar lasan 1,644 mm pada *welding speed* 3 m/min, dan lebar lasan 1,7941 mm pada *welding speed* 3,5 m/min. Pada Gambar 4.14 dapat dilihat dengan power 2500 W akan didapat lebar lasan 1,8621 mm pada *welding speed* 2,5 m/min, lebar lasan 1,680 mm pada *welding speed* 3 m/min, dan lebar lasan 1,6769 mm pada *welding speed* 3,5 m/min. Pada Gambar 4.15 dapat dilihat dengan power 2750 W akan didapat lebar lasan 1,9273 mm pada *welding speed* 2,5 m/min, lebar lasan 1,74 mm pada *welding speed* 3 m/min, dan lebar lasan 1,695 mm pada *welding speed* 3,5 m/min.

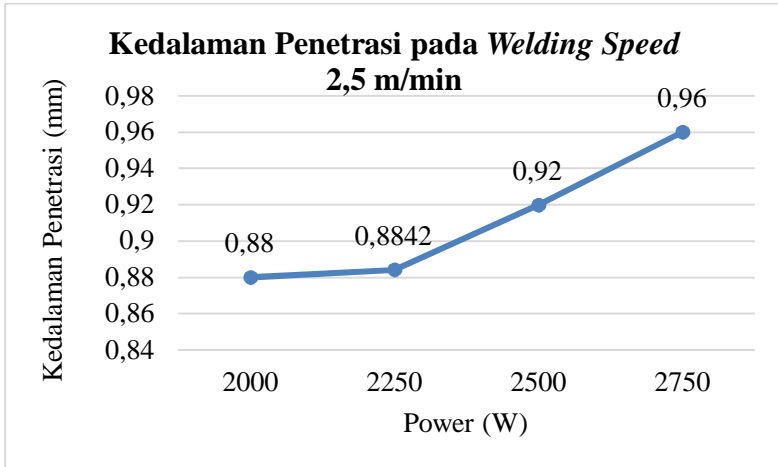


Gambar 4. 16 Lebar Lasan Pengelasan Laser Esshete 1250
Berdasarkan Power Input

Pada Gambar 4.16 dapat dilihat perbedaan lebar lasan pada power input yang sama namun dengan *welding speed* yang berbeda. Pada setiap power input yang sama, terdapat lebar lasan yang semakin sempit pada *welding speed* yang semakin besar. *Welding speed* mempengaruhi waktu yang digunakan sinar laser untuk memanaskan titik-titik las laser. Semakin besar *welding speed* maka semakin cepat waktu yang digunakan oleh sinar laser untuk melelehkan logam las. Semakin lama waktu sebuah sinar laser memanaskan logam, maka semakin besar pula panas yang timbulkan sehingga semakin lebar HAZ yang dihasilkan. Seperti pengelasan yang dilakukan oleh Mutiara (1998) dimana semakin lama waktu pengelasan maka semakin lebar HAZ yang dihasilkan. Namun apabila waktu yang dipergunakan terlalu singkat maka panas yang timbul akan sangat sedikit, sehingga bisa jadi tidak terjadi pelelehan logam dan tidak terjadi proses penyambungan. Jiang (2016) juga menghasilkan simulasi yang

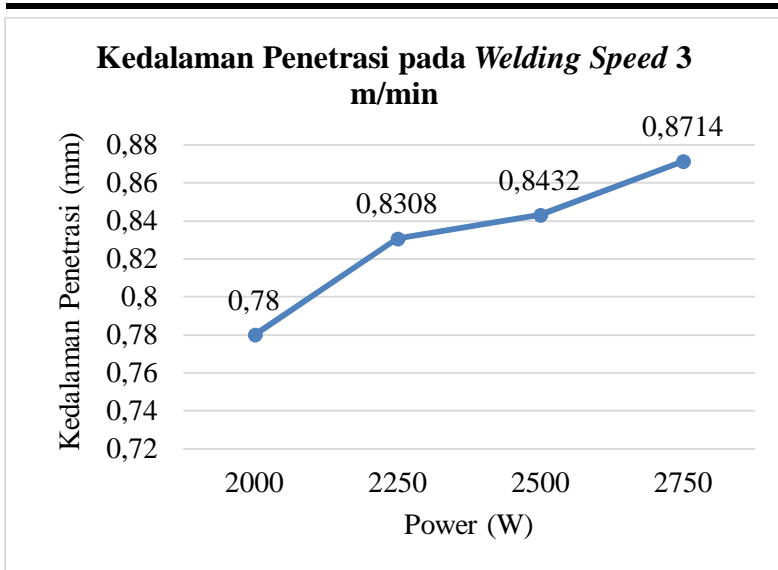


membuktikan bahwa pengaruh kecepatan dalam menentukan lebar lasan adalah berbanding terbalik. Semakin tinggi *welding speed* maka akan semakin kecil lebar lasan yang ada.



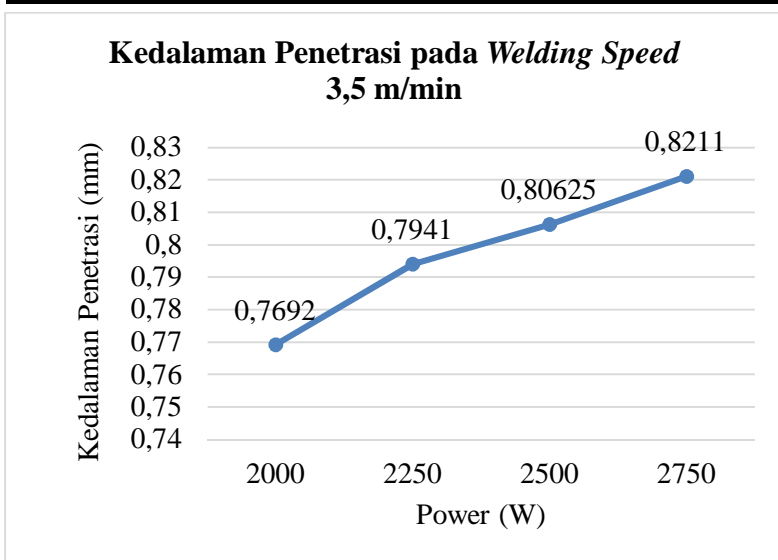
Gambar 4. 17 Kedalaman Penetrasi pada Welding Speed 2,5 m/min

Gambar 4.17 menjelaskan bahwa pada *welding speed* 2,5 m/min terdapat nilai kedalaman penetrasi yang berbeda-beda. Pada power 2000 W terdapat kedalaman penetrasi 0,88 mm, pada power 2250 W terdapat kedalaman penetrasi 0,8842 mm, pada power 2500 W terdapat kedalaman penetrasi 0,92 mm, dan pada power input 2750 W terdapat kedalaman penetrasi 0,96 mm. kedalaman penetrasi terlihat meningkat seiring dengan bertambahnya power input laser pada pengelasan dengan *welding speed* 2,5 m/min.



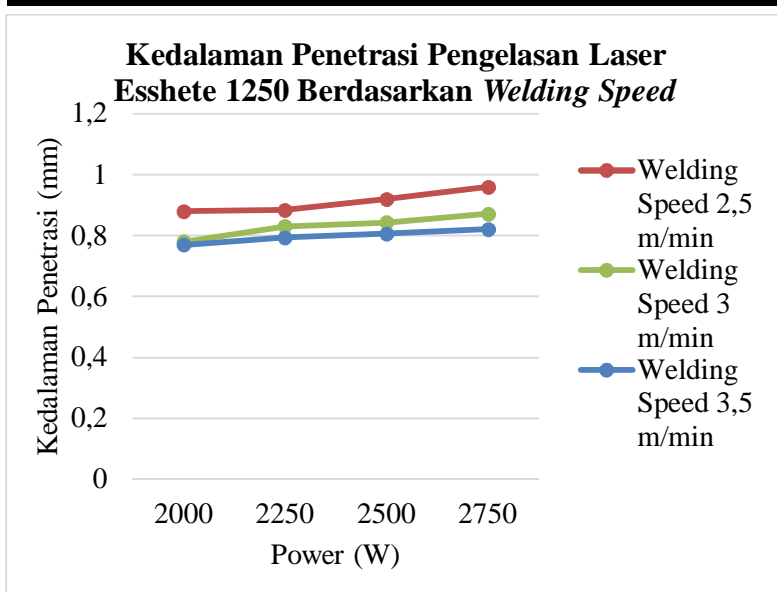
Gambar 4. 18 Kedalaman Penetrasi pada Welding Speed 3 m/min

Gambar 4.18 menjelaskan bahwa pada *welding speed* 3 m/min terdapat nilai kedalaman penetrasi yang berbeda-beda. Pada power 2000 W terdapat kedalaman penetrasi 0,78 mm, pada power 2250 W terdapat kedalaman penetrasi 0,8308 mm, pada power 2500 W terdapat kedalaman penetrasi 0,8432 mm, dan pada power input 2750 W terdapat kedalaman penetrasi 0,8714 mm. kedalaman penetrasi terlihat meningkat seiring dengan bertambahnya power input laser pada pengelasan dengan *welding speed* 3 m/min.



Gambar 4. 19 Kedalaman Penetrasi pada *Welding Speed* 3,5 m/min

Gambar 4.19 menjelaskan bahwa pada *welding speed* 3 m/min terdapat nilai kedalaman penetrasi yang berbeda-beda. Pada power 2000 W terdapat kedalaman penetrasi 0,7692 mm, pada power 2250 W terdapat kedalaman penetrasi 0,7941 mm, pada power 2500 W terdapat kedalaman penetrasi 0,80625 mm, dan pada power input 2750 W terdapat kedalaman penetrasi 0,8211 mm. kedalaman penetrasi terlihat meningkat seiring dengan bertambahnya power input laser pada pengelasan dengan *welding speed* 3,5 m/min.

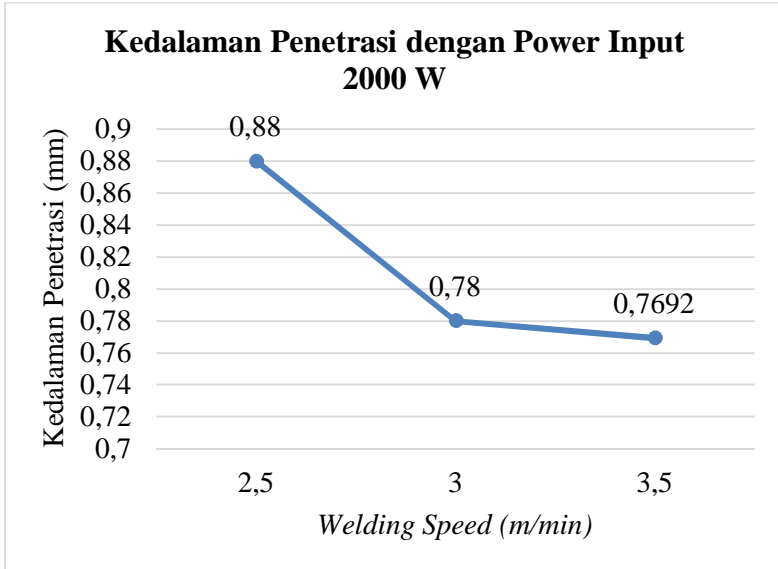


Gambar 4. 20 Kedalaman Penetrasi Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan *Welding Speed*

Gambar 4.20 memperlihatkan pengaruh power input dan *welding speed* terhadap kedalaman penetrasi material Esshete 1250. Gambar 4.20 menunjukkan bahwa pada *welding speed* yang sama, terdapat nilai kedalaman penetrasi yang semakin dalam. Hal ini dikarenakan semakin besar power input yang digunakan pada pengelasan, maka semakin besar heat flux yang digunakan untuk melelehkan material pada titik-titik las laser. Semakin besar nilai heat flux yang diterima oleh material maka akan semakin dalam material dasar yang dilelehkan dengan minimum temperatur leleh 1400 °C. Hasil ini sesuai dengan penelitian Dani (2016) yang menyatakan bahwa semakin tinggi arus pengelasan maka akan semakin memperdalam penetrasi. Begitu juga Sonawan (2006) yang berbicara hal yang sama. Jiang (2016) dalam simulainya juga melakukan penghitungan pada kedalaman penetrasi pengelasan stainless steel 316 L dan didapatkan pula nilai kedalaman penetrasi yang semakin besar

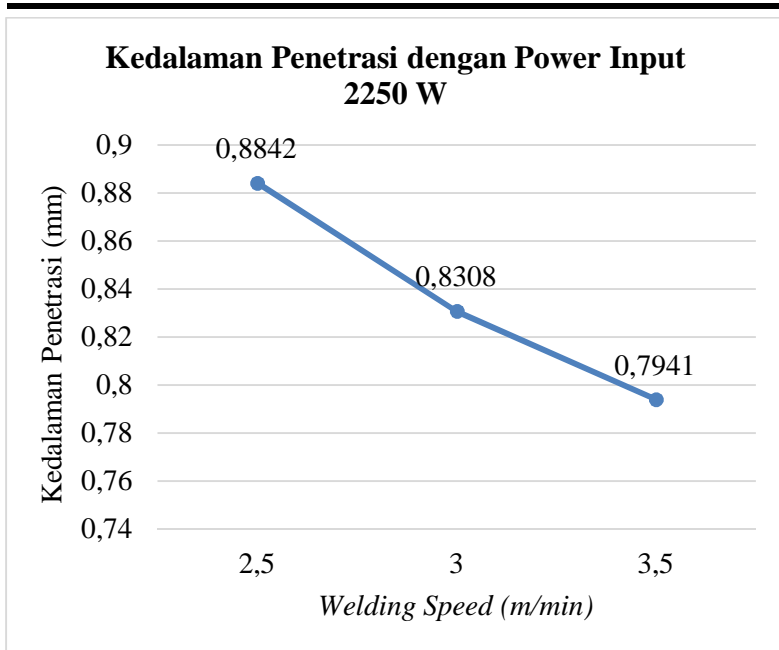


seiring dengan bertambahnya power input yang digunakan oleh pengelasan.



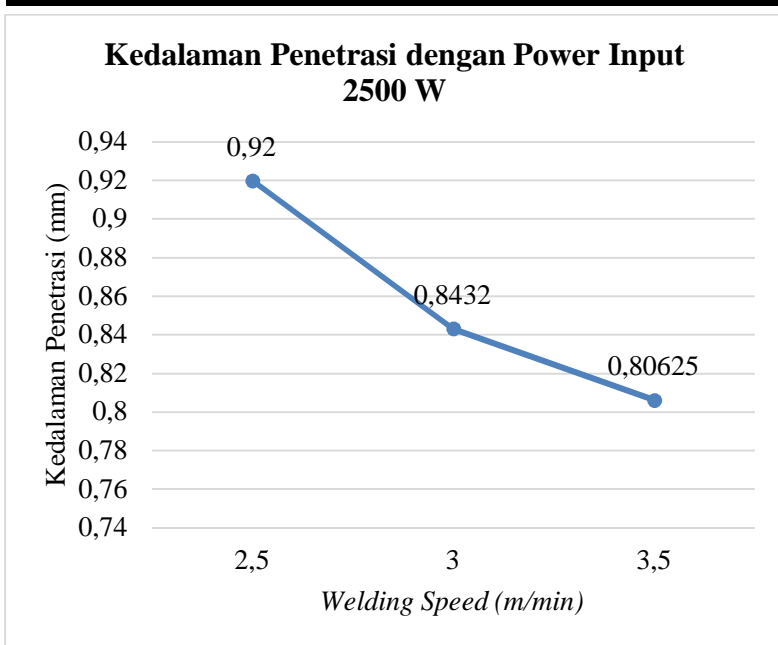
Gambar 4. 21 Kedalaman Penetrasi dengan Power 2000 W

Pada Gambar 4.21 dapat dilihat kedalaman penetrasi dengan power 2000 W sebesar 0,88 mm dengan *welding speed* 2,5 m/min. Dengan *welding speed* 3 m/min menghasilkan kedalaman penetrasi sebesar 0,78 m/min. Kemudian pada *welding speed* 3,5 m/min kedalaman penetrasi yang dihasilkan adalah 0,7692 mm. Kedalaman penetrasi terlihat berkurang seiring dengan bertambahnya *welding speed*.



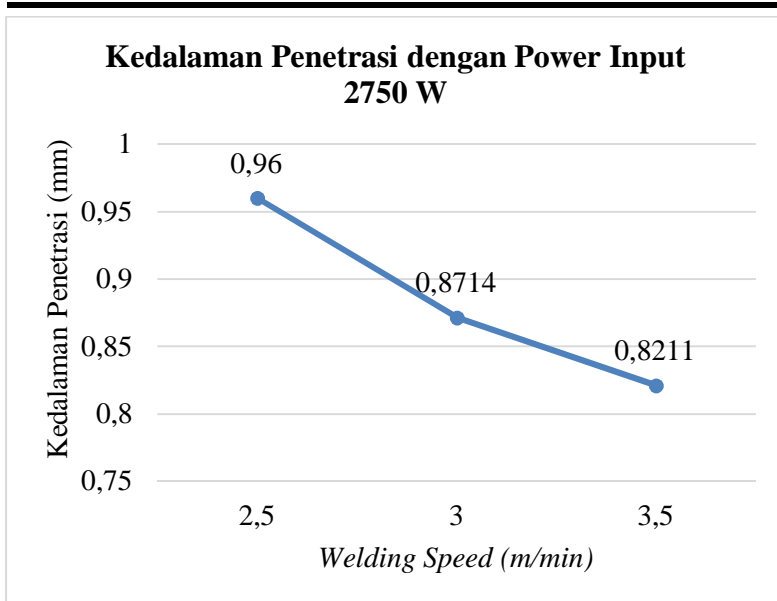
Gambar 4. 22 Kedalaman Penetrasi dengan Power 2250 W

Pada Gambar 4.22 terlihat pada power input laser 2250 W, didapatkan kedalaman penetrasi yang berbeda-beda. Pada *welding speed* 2,5 m/min didapatkan kedalaman penetrasi sebesar 0,8842 mm. Kemudian pada *welding speed* 3 m/min didapatkan kedalaman penetrasi sebesar 0,8308 mm. pada *welding speed* 3,5 m/min didapatkan kedalaman penetrasi sebesar 0,7941 mm. Kedalaman penetrasi terlihat berkurang seiring dengan *welding speed* yang bertambah.



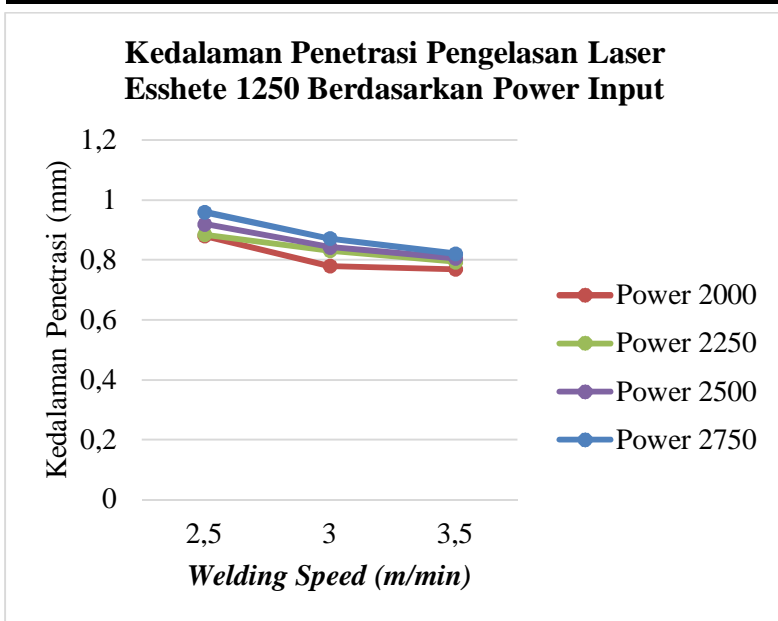
Gambar 4. 23 Kedalaman Penetrasi dengan Power 2500 W

Pada Gambar 4.23 kedalaman penetrasi berbeda-beda dengan *welding speed* yang berbeda. Dengan power input laser yang sama, yaitu 2500 W, akan didapatkan kedalaman penetrasi sebesar 0,92 mm pada *welding speed* 2,5 m/min. Pada *welding speed* 3 m/min didapatkan kedalaman penetrasi sebesar 0,8432 mm. kemudian pada *welding speed* 3,5 m/min didapatkan kedalaman penetrasi sebesar 0,80625 mm. Dari ketiga *welding speed* pada Gambar 4.23 dapat dilihat kedalaman penetrasi yang semakin berkurang seiring dengan *welding speed* yang semakin besar atau semakin cepat.



Gambar 4. 24 Kedalaman Penetrasi dengan Power 2750 W

Pada Gambar 4.24 dapat dilihat kedalaman penetrasi dengan power input laser sebesar 2750 W. Pada power input yang sama akan didapatkan kedalaman penetrasi yang berbeda-beda. *Welding speed* 2,5 m/min akan menghasilkan kedalaman penetrasi sebesar 0,96 mm. *Welding speed* 3 m/min akan menghasilkan kedalaman penetrasi sebesar 0,8714 mm. Kemudian pada *welding speed* 3,5 m/min dihasilkan kedalaman penetrasi sebesar 0,8211 mm. Kedalaman penetrasi dari ketiga *welding speed* memiliki nilai yang berkurang seiring dengan bertambahnya besar *welding speed*.



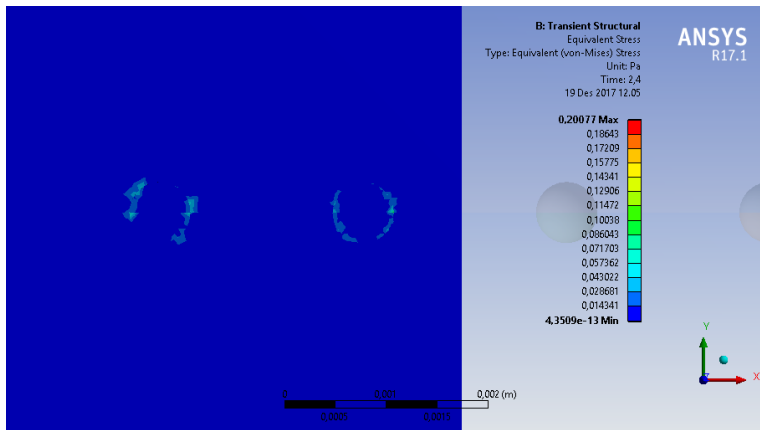
Gambar 4. 25 Kedalaman Penetrasi Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan Power Input

Pada Gambar 4.25 dapat juga terlihat bahwa dalam power input yang sama dan *welding speed* yang berbeda, maka akan menghasilkan kedalaman penetrasi yang *welding speed* berbeda. Kedalaman penetrasi semakin kecil pada *welding speed* yang semakin tinggi. Hal ini dapat terjadi karena kecepatan menentukan waktu pelelehan setiap titik pada titik-titik pengelasan laser. Semakin kecil kecepatan pengelasan maka akan menghasilkan waktu pelelehan yang lebih lama pada setiap titik-titiknya. Waktu pelelehan material yang lebih lama mengakibatkan lelehan yang semakin banyak pada material sehingga kedalaman penetrasi material yang meleleh semakin besar. Seperti yang dikatakan Dani (2016) pada penelitiannya bahwa kedalaman penetrasi dipengaruhi oleh kecepatan las dimana kecepatan las yang semakin tinggi akan menghasilkan kedalaman penetrasi yang semakin dalam. Hal ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Sriwidharto (2006),

kecepatan pengelasan merupakan variabel yang tidak bebas dan dipilih variabel lain seperti arus dan tegangan untuk mendapatkan mutu dan keseragaman las. Pada kecepatan yang semakin tinggi maka akan didapatkan kedalaman penetrasi las yang semakin dalam.

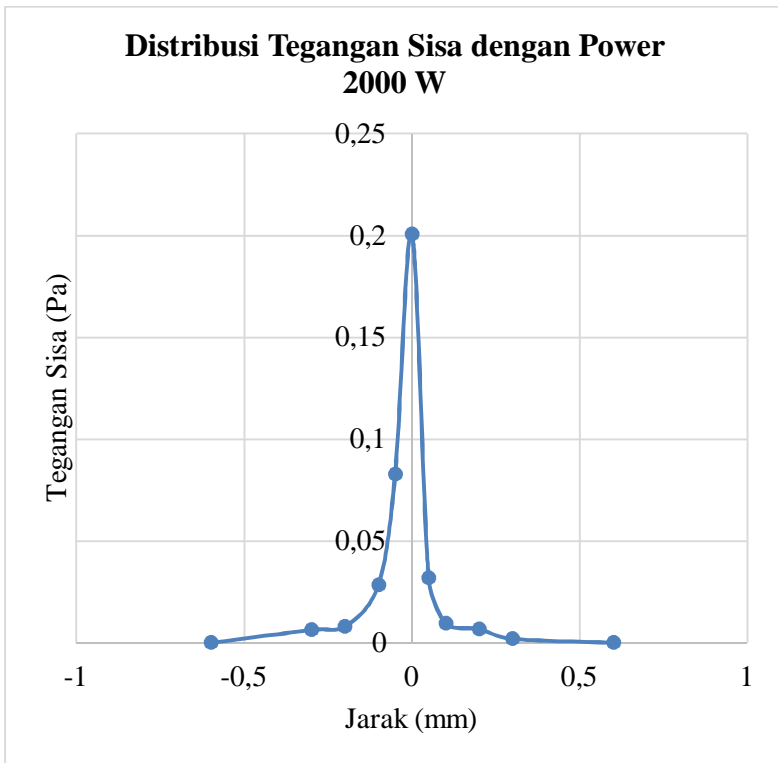
4.3.2 Struktural

Pada simulasi *transient structural*, *boundary condotion* yang diberikan adalah *fix support* pada permukaan geometri bagian bawah. Hal ini bertujuan untuk mengkondisikan simulasi semirip mungkin dengan kondisi pengelasan pada kondisi sebenarnya. Pembebanan ini menggambarkan kondisi material pengelasan yang berada pada sebuah magnet sebagai *holding* meja kerja. Pembebanan yang diberikan pada simulasi struktural adalah temperatur hasil simulasi *transient thermal* yang dilakukan sebelumnya. Input yang diberikan berupa *import body temperatur* yang dilakukan secara otomatis oleh program ANSYS Workbench *Transient Structural*. Output yang ingin dilihat adalah berupa tegangan sisa dalam satuan Pa. Tegangan dilihat menggunakan *Equivalent Stress (Von Misses)*.



Gambar 4. 26 Geometri Pengukuran Tegangan Sisa (Pa)

Pada Gambar 4.26 terlihat bahwa tegangan terbesar berada pada daerah di sekitar titik pengelasan. Hal ini terjadi karena titik pengelasan adalah bagian yang menerima *heat flux* dari sinar laser yang kemudian menghasilkan temperatur paling panas sehingga tegangan yang terjadi bagian ini sangatlah tinggi jika dibandingkan dengan bagian lain di sekitar titik. Tegangan sisa menurun seiring dengan temperatur yang semakin turun saat menjauhi daerah pengelasan maupun daerah HAZ.



Gambar 4. 27 Distribusi *Thermal Stress* Arah Sumbu Y pada Pengelasan Esshete 1250 Case 1

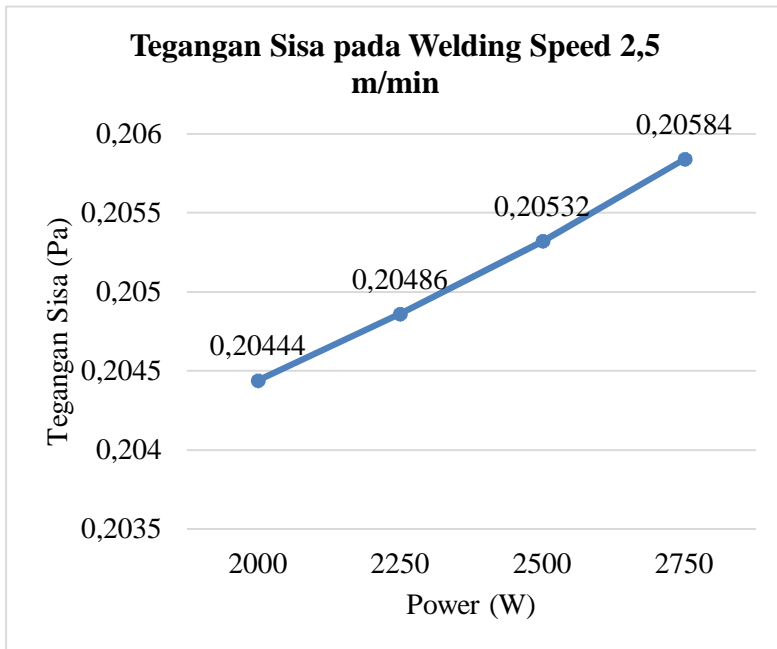
Pada Gambar 4.27 dapat dilihat distribusi tegangan yang disebabkan oleh temperatur input pada pengelasan titik ke 29..



Tegangan paling tinggi berada pada bagian titik pengelasan, yaitu pada jarak 0 mm pada grafik. Tegangan sisa yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 adalah tegangan sisa dengan power input 2000 W dan dengan *welding speed* 2,5 m/min. Tegangan sisa maksimum sebesar 0,20444 Pa. Pada temperatur masih relatif tinggi terjadi beberapa pola tegangan kompleks. Pada daerah *weld metal* yang masih tinggi temperaturnya terjadi tegangan tarik. Pada bagian *base metal* akan terjadi tegangan tekan sampai pada ujung *base metal*. Pengukuran tegangan sisa dari setiap simulasi (dari *case* 1 sampai *case* 12) ditunjukkan oleh Tabel 4.4 dibawah. Tegangan sisa dari setiap simulasi memiliki pola yang sama dengan Gambar 4.27. Yaitu tegangan sisa terbesar adalah pada titik pengelasan dan tegangan minimum adalah pada daerah yang paling jauh dari titik pengelasan. Namun karena pengelasan laser adalah pengelasan dengan melelehkan *fiber* dengan titik-titik maka tegangan sisa yang dihasilkan oleh proses pengelasan tidaklah besar. Tegangan sisa yang dihasilkan oleh pengelasan tidak lebih dari 0,3 Pa seperti yang dijabarkan pada Tabel 4.4.

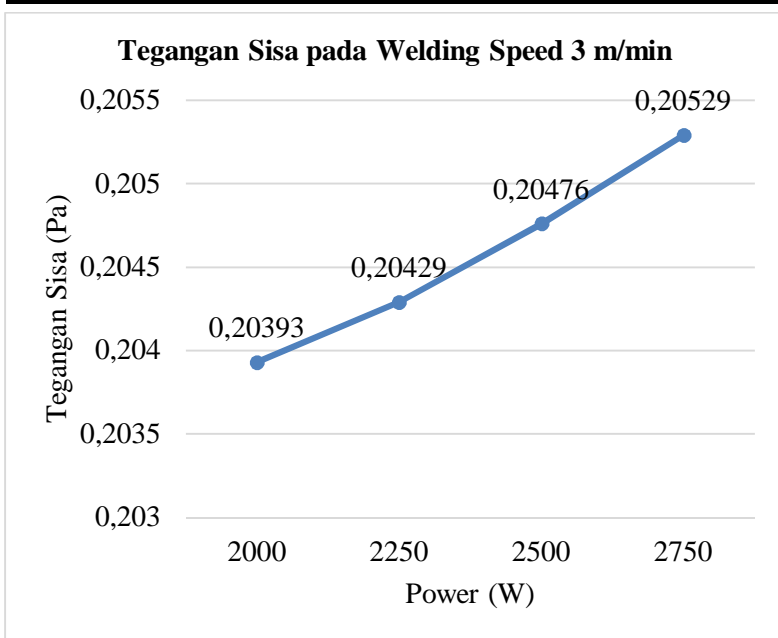
Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran Tegangan Sisa pada Pengelasan

<i>Case</i>	Welding Speed (m/min)	Power Input (W)	Tegangan Sisa (Pa)
1	2,5	2000	0,20444
2		2250	0,20486
3		2500	0,20532
4		2750	0,20584
5	3	2000	0,20393
6		2250	0,20429
7		2500	0,20476
8		2750	0,20529
9	3,5	2000	0,19931
10		2250	0,19975
11		2500	0,20023
12		2750	0,20077



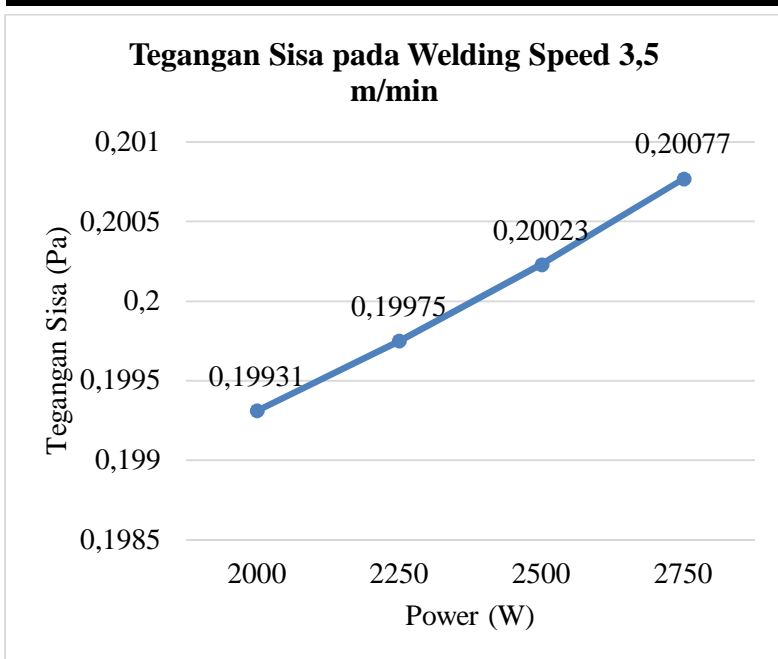
Gambar 4. 28 Tegangan Sisa pada *Welding Speed* 2,5 m/min

Gambar 4.28 menjelaskan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan dengan *welding speed* 2,5 m/min dan dengan power input yang berbeda-beda. Gambar 4.28 dapat dilihat tegangan sisa pada power 2000 W sebesar 0,20444 Pa. Pada power 2250 W tegangan sisa sebesar 0,20486 Pa. Pada power input 2500 W tegangan sisanya 0,20532 Pa. Sementara pada power 2750 W didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20584 Pa. Dari keempat titik diatas dapat disimpulkan bahwa tegangan sisa semakin bertambah seiring dengan bertambahnya power input laser.



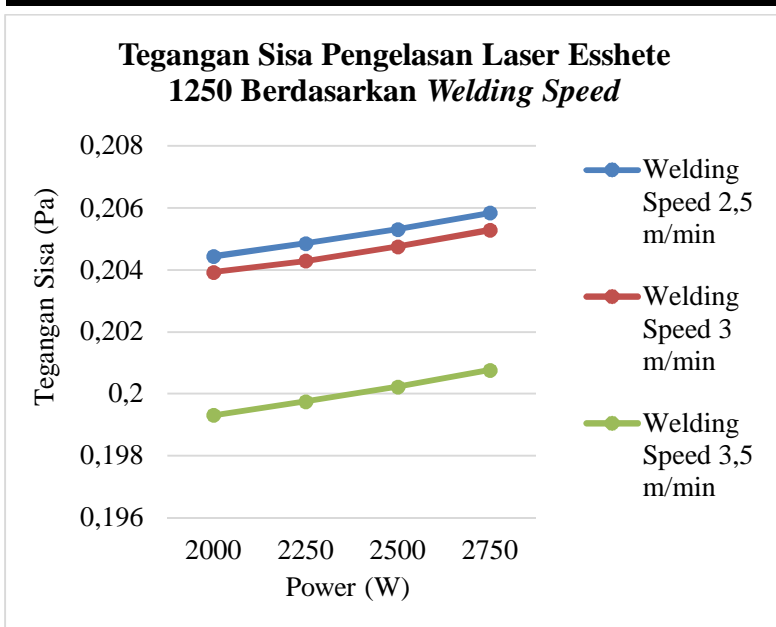
Gambar 4. 29 Tegangan Sisa pada Welding Speed 3 m/min

Gambar 4.29 menjelaskan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan dengan *welding speed* 3 m/min dan dengan power input yang berbeda-beda. Gambar 4.29 dapat dilihat tegangan sisa pada power 2000 W sebesar 0,20393 Pa. Pada power 2250 W tegangan sisa sebesar 0,20429 Pa. Pada power input 2500 W tegangan sisanya 0,20476 Pa. Sementara pada power 2750 W didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20529 Pa. Dari keempat titik diatas dapat disimpulkan bahwa tegangan sisa semakin bertambah seiring dengan bertambahnya power input laser.



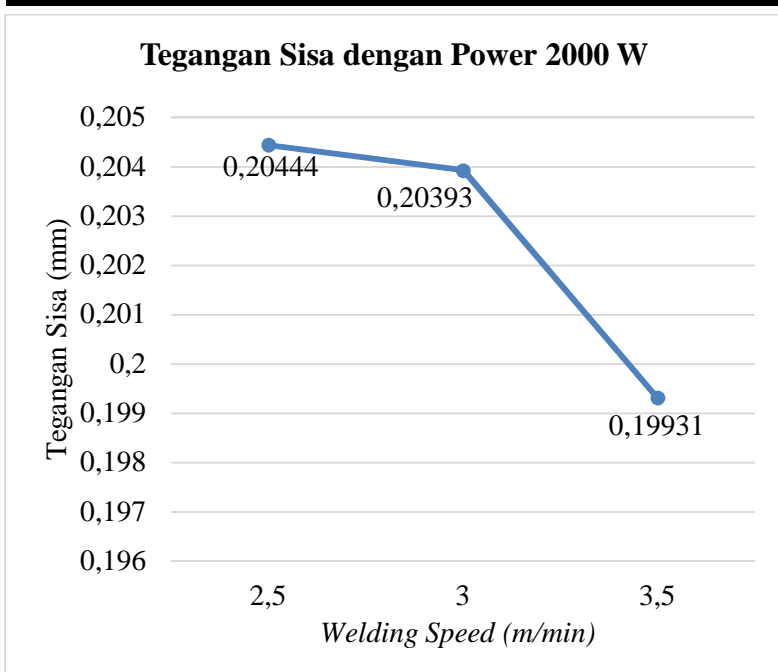
Gambar 4. 30 Tegangan Sisa pada Welding Speed 3,5 m/min

Gambar 4.30 menjelaskan tegangan sisa yang terjadi pada pengelasan dengan *welding speed* 3,5 m/min dan dengan power input yang berbeda-beda. Gambar 4.30 dapat dilihat tegangan sisa pada power 2000 W sebesar 0,19931 Pa. Pada power 2250 W tegangan sisa sebesar 0,19975 Pa. Pada power input 2500 W tegangan sisanya 0,20023 Pa. Sementara pada power 2750 W didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20077 Pa. Dari keempat titik diatas dapat disimpulkan bahwa tegangan sisa semakin bertambah seiring dengan bertambahnya power input laser.



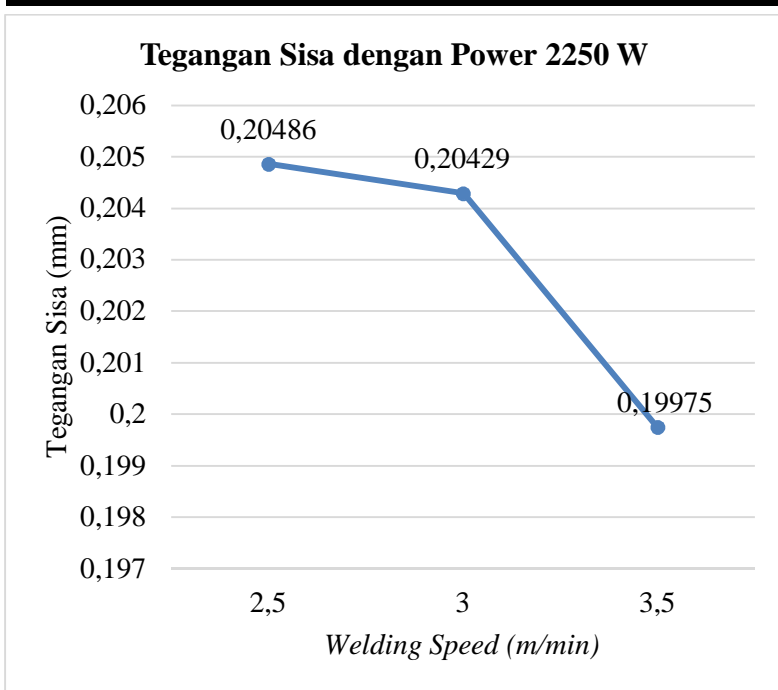
Gambar 4. 31 Tegangan Sisa Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan Welding Speed

Dari hasil simulasi pada Gambar 4.31 dapat dilihat tegangan sisa yang berbeda-beda dengan nilai power input yang berbeda-beda. Pada power input yang semakin tinggi didapatkan tegangan sisa yang semakin besar. Hal ini karena distribusi temperatur dihasilkan pada simulasi *transient thermal* berbeda-beda sesuai dengan input *heat flux* yang diterima pada setiap titik. Hasil tegangan sisa ini juga bergantung pada waktu yang diterima oleh masing-masing titik untuk melelehkan logam. Perhitungan tegangan sisa berdasarkan pada persamaan 2.10. Sehingga power input yang besar akan menghasilkan tegangan sisa yang besar.



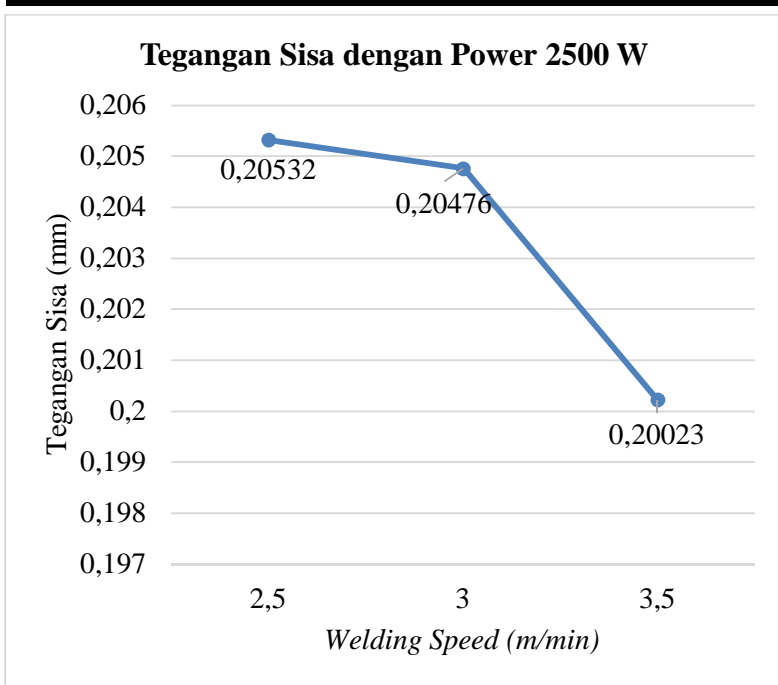
Gambar 4. 32 Tegangan Sisa dengan Power 2000 W

Gambar 4.32 menunjukkan tegangan sisa pada power 2000 W dan dengan *welding speed* yang berbeda-beda. Pada *welding speed* 2,5 m/min didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20444 Pa. Pada *welding speed* 3 m/min didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20393 Pa. Kemudian pada *welding speed* 3,5 m/min didapatkan tegangan sisa 0,19931 Pa. Pada Gambar 4.32 dapat dilihat tegangan sisa menurun seiring dengan bertambahnya *welding speed* pada pengelasan.



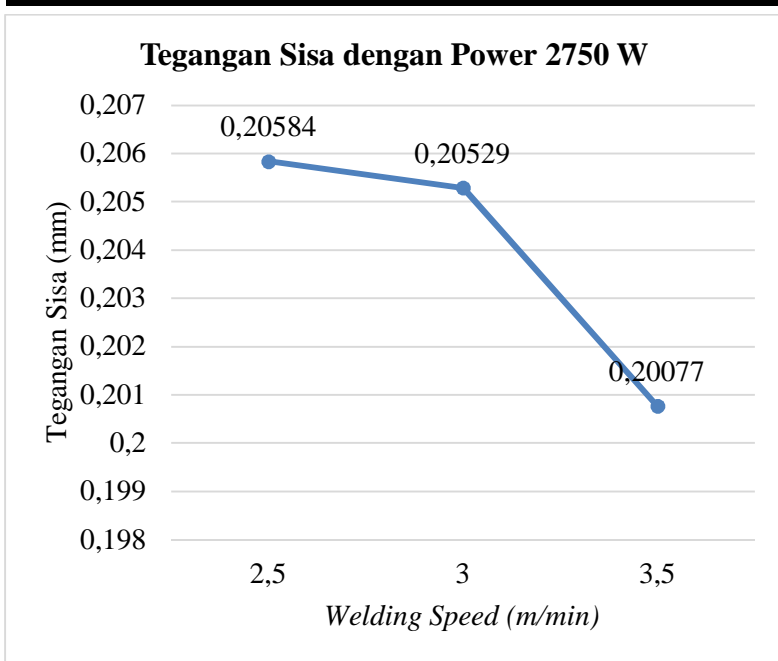
Gambar 4. 33 Tegangan Sisa dengan Power 2250 W

Gambar 4.33 menunjukkan tegangan sisa pada power 2250 W dan dengan *welding speed* yang berbeda-beda. Pada *welding speed* 2,5 m/min didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20486 Pa. Pada *welding speed* 3 m/min didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20429 Pa. Kemudian pada *welding speed* 3,5 m/min didapatkan tegangan sisa 0,19975 Pa. Pada Gambar 4.33 dapat dilihat tegangan sisa menurun seiring dengan bertambahnya *welding speed* pada pengelasan.



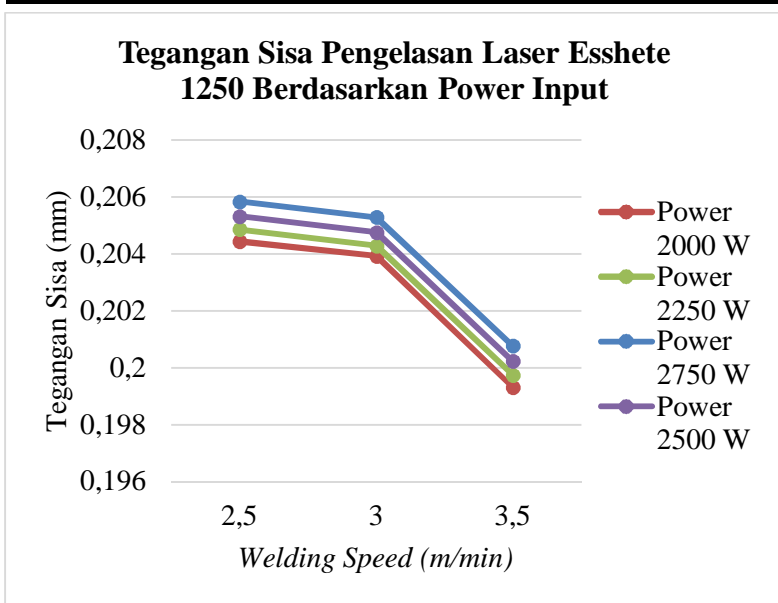
Gambar 4. 34 Tegangan Sisa dengan Power 2500 W

Gambar 4.34 menunjukkan tegangan sisa pada power 2500 W dan dengan *welding speed* yang berbeda-beda. Pada *welding speed* 2,5 m/min didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20532 Pa. Pada *welding speed* 3 m/min didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20476 Pa. Kemudian pada *welding speed* 3,5 m/min didapatkan tegangan sisa 0,20023 Pa. Pada Gambar 4.34 dapat dilihat tegangan sisa menurun seiring dengan bertambahnya *welding speed* pada pengelasan.



Gambar 4. 35 Tegangan Sisa dengan Power 2750 W

Gambar 4.35 menunjukkan tegangan sisa pada power 2750 W dan dengan *welding speed* yang berbeda-beda. Pada *welding speed* 2,5 m/min didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20584 Pa. Pada *welding speed* 3 m/min didapatkan tegangan sisa sebesar 0,20529 Pa. Kemudian pada *welding speed* 3,5 m/min didapatkan tegangan sisa 0,20077 Pa. Pada Gambar 4.35 dapat dilihat tegangan sisa menurun seiring dengan bertambahnya *welding speed* pada pengelasan.



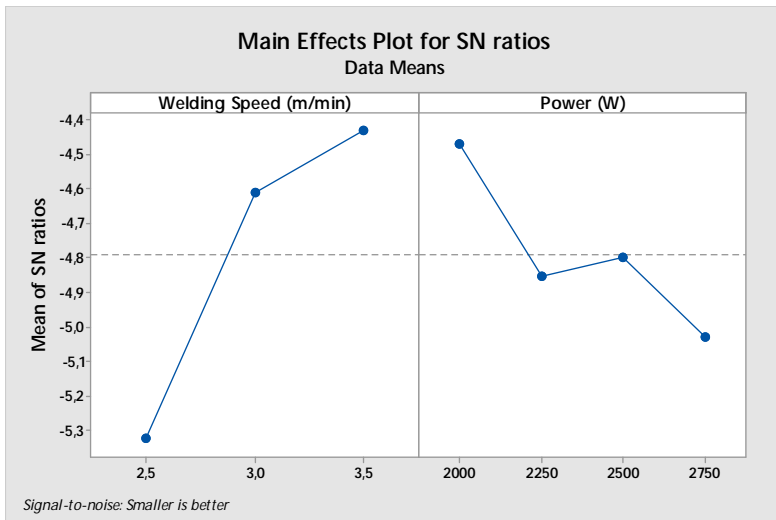
Gambar 4. 36 Tegangan Sisa Pengelasan Laser Esshete 1250 Berdasarkan Power Input

Gambar 4.36 memberikan kesimpulan dimana tegangan sisa semakin berkurang seiring dengan bertambahnya *welding speed* pengelasan. Hal ini terjadi karena semakin besar *welding speed* maka waktu yang dibutuhkan setiap titik dalam menerima *heat flux* akan semakin kecil. Sehingga proses pemanasan yang menghasilkan tegangan sisa akan semakin cepat. Hasil simulasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.31 dan Gambar 4.36 sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Georgeta (2012) dimana tegangan sisa akan semakin tinggi dengan semakin tingginya power input dan tegangan sisa akan semakin rendah pada *welding speed* yang semakin tinggi. Tegangan sisa juga akan semakin kecil apabila titik pengelasan laser memiliki diameter yang semakin besar.

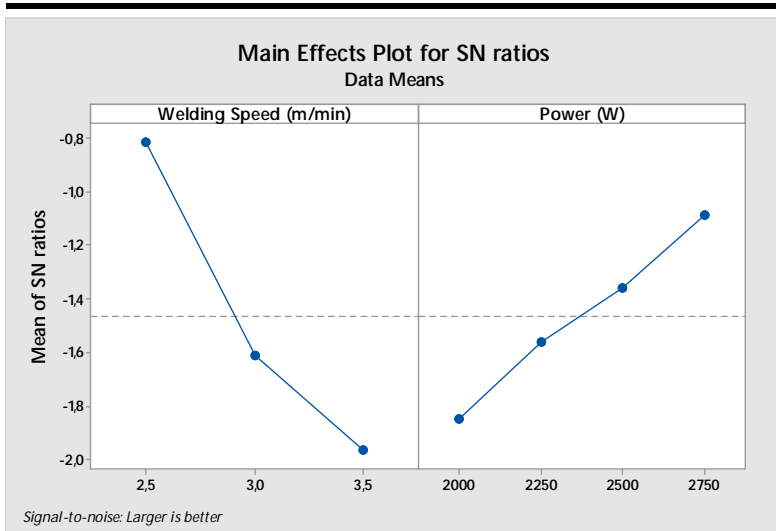


4.4 Optimasi Hasil Simulasi

Hasil simulasi pengelasan laser yang telah dilakukan menghasilkan lebar lasan, kedalaman penetrasi, dan tegangan sisa yang berbeda-beda dan diuraikan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3. Hasil simulasi yang variatif ini dapat menggambarkan bagaimana pengaruh power input laser dalam pengelasan terhadap lebar lasan, kedalaman penetrasi dan tegangan sisa material Esshete 1250. Hasil ini juga dapat menggambarkan bagaimana pengaruh *welding speed* terhadap lebar lasan, kedalaman penetrasi dan tegangan sisa material Esshete 1250.

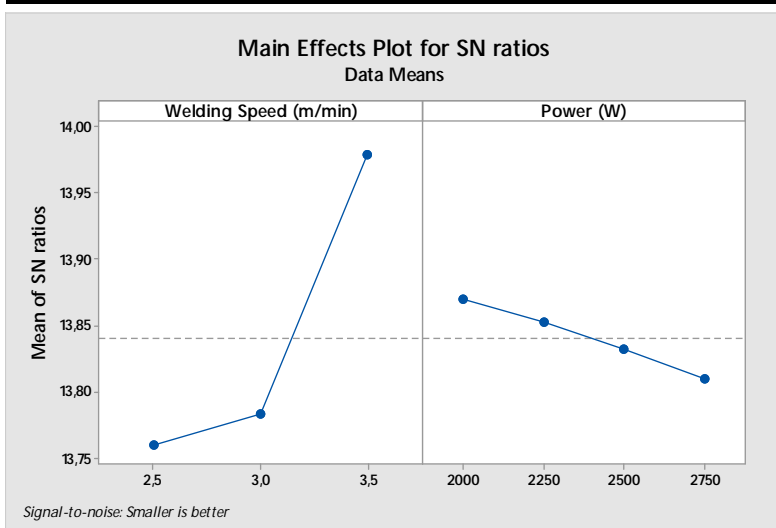


Gambar 4. 37 Pengaruh *Welding Speed* dan Power Input terhadap Lebar Lasan



Gambar 4. 38 Pengaruh *Welding Speed* dan Power Input terhadap Kedalaman Penetrasi

Gambar 4.37 adalah pengaruh *welding speed* dan power input dalam menentukan lebar lasan material Esshete 1250. Gambar 4.37 menunjukkan bahwa untuk mendapatkan lebar lasan yang minimum maka dibutuhkan *welding speed* yang semakin tinggi dan power input yang semakin rendah. Sementara Gambar 4.38 adalah pengaruh *welding speed* dan power input terhadap kedalaman penetrasi pengelasan laser Esshete 1250. Untuk mendapatkan kedalaman penetrasi yang maksimum dalam sebuah proses pengelasan dibutuhkan *welding speed* yang semakin kecil dan power input yang semakin besar. Lebar lasan yang minimum akan mengurangi adanya perubahan struktur mikro dalam sambungan lasan (daerah HAZ) dan kedalaman penetrasi yang maksimum akan memperdalam daerah lekatan diantara dua material las yang berbeda.



Gambar 4. 39 Pengaruh *Welding Speed* dan Power Input terhadap Tegangan Sisa

Gambar 4.39 menjelaskan pengaruh *welding speed* dan power input terhadap tegangan sisa pada pengelasan laser material Esshete 1250. Pada gambar dijelaskan bahwa untuk mendapatkan tegangan sisa yang minimum maka dibutuhkan input *welding speed* yang semakin tinggi dan power input yang semakin rendah. Hal ini sesuai dengan hasil simulasi dan beberapa jurnal yang telah melakukan simulasi sebelumnya seperti yang dijelaskan pada subbab 4.3. Dari berbagai plot pengaruh *welding speed* dan power input terhadap lebar lasan, kedalaman penetrasi, dan tegangan sisa di atas, dapat dirumuskan nilai optimasi *welding speed* dan power input untuk mendapatkan lebar lasan yang minimum, kedalaman penetrasi yang maksimum dan tegangan sisa yang minimum.

Untuk mengetahui kondisi optimal yang dibutuhkan untuk mendapatkan hasil lebar lasan yang minimum, kedalaman penetrasi yang maksimum, dan tegangan sisa yang minimum, maka perlu adanya analisis terhadap masing-masing parameter. Analisis dilakukan menggunakan Minitab17 dengan tipe analisa



data DOE *Response Surface Methodology Design Analysis*. Analisa data ini melakukan analisa pada setiap respon (lebar lasan, kedalaman penetrasi dan tegangan sisa) yang dipengaruhi oleh faktor-faktor inputnya (*welding speed* dan power input). Sehingga dapat dilihat rentang nilai *welding speed* dan power input yang optimal sesuai dengan output respon yang dibutuhkan dimana lebar lasan minimum, kedalaman penetrasi maksimum, dan tegangan sisa yang minimum.

4.4.1 Analisa RSM Lebar Lasan

Desain eksperimen untuk menganalisa pengaruh *welding speed* dan power input terhadap lebar lasan pengelasan laser Esshete 1250 dibuat seperti pada Tabel 4.6. Tabel ini mendistribusikan angka *Std Order*, *Run Order*, *Blocks*, dan *Pt Type* sesuai dengan jenis analisa data yaitu *DOE Response Surface Methodology*. *Respons* yang digunakan adalah Lebar Lasan (mm) kemudian faktor yang digunakan ada dua yaitu *welding speed* dan power input.

Tabel 4. 4 Desain Eksperimen dan Analisis Data Lebar Lasan

Std Order	Run Order	Blocks	Pt Type	WS (m/min)	P (W)	LL (mm)
1	1	1	1	2,5	2000	1,7647
2	2	1	1	2,5	2250	1,8333
3	3	1	1	2,5	2500	1,8621
4	4	1	1	2,5	2750	1,9273
5	5	1	1	3	2000	1,65
6	6	1	1	3	2250	1,7333
7	7	1	1	3	2500	1,7143
8	8	1	1	3	2750	1,74
9	9	1	1	3,5	2000	1,6098
10	10	1	1	3,5	2250	1,6833
11	11	1	1	3,5	2500	1,6769
12	12	1	1	3,5	2750	1,695



Keterangan :

WS : *Welding Speed* (m/min)

P : Power Input Laser (W)

LL : Lebar Lasan (mm)

Analisa RSM menghasilkan persamaan regresi sebagai berikut :

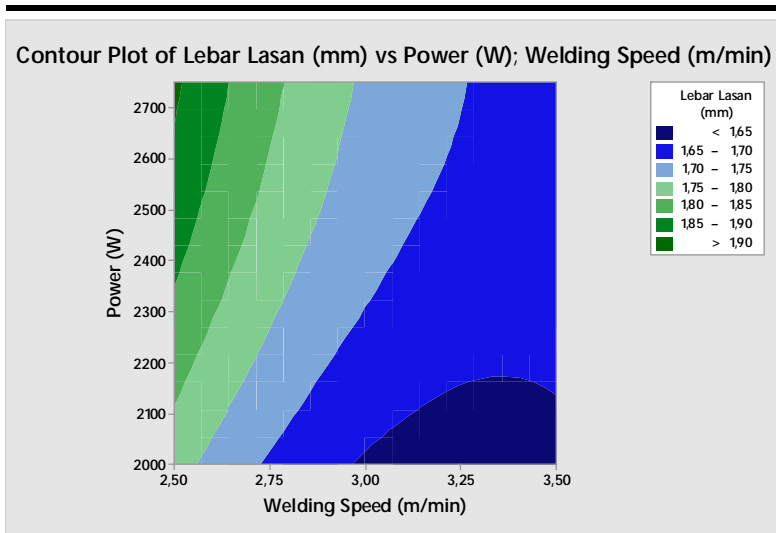
$$\begin{aligned} \text{Lebar Lasan (mm)} = & 2,57 - 1,264X_1 \\ & + 0,000972X_2 \\ & + 0,2229X_1^2 \\ & - 0,000000X_2^2 - \\ & 0,000107X_1X_2 \quad \dots\dots\dots(4.1) \end{aligned}$$

Dimana,

X_1 = *Welding Speed* (m/min)

X_2 = Power (W)

Persamaan (4.1) merumuskan pengaruh *welding speed* dan power terhadap lebar pengelasan. Seberapa besar pengaruhnya, dan bagaimana seharusnya besar *welding speed* dan power yang sesuai dengan kondisi optimal yaitu lebar lasan yang minimum. Untuk melihatnya lebih jelas, analisa RSM pada lebar lasan dapat di plot menggunakan *contour plot* seperti pada Gambar 4.40.

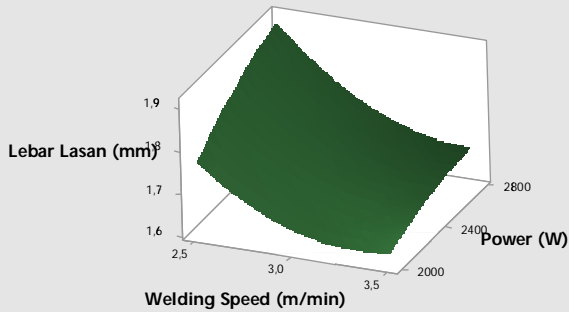


Gambar 4. 40 *Contour Plot* RSM Lebar Lasan

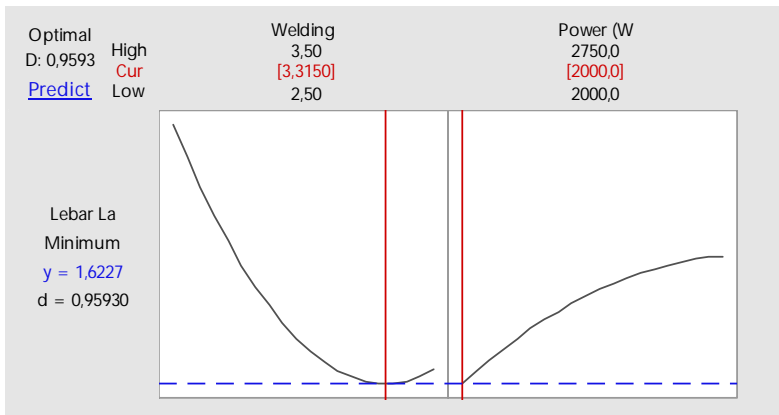
Gambar 4.40 memperlihatkan *contour plot* berdasarkan warna yang berbeda-beda. Warna biru tua memperlihatkan lebar lasan kurang dari 1,65 mm dan warna hijau tua memperlihatkan lebar lasan lebih dari 1,90 mm. Masing-masing warna dipengaruhi oleh dua faktor input dimana *welding speed* berada dalam sumbu x dan power input berada dalam sumbu y. Gambar 4.41 adalah *surface plot* simulasi lebar lasan pengelasan yang menggambarkan hasil simulasi dalam 3 sumbu dimana sumbu x_1 yaitu *welding speed* (m/min), sumbu x_2 yaitu lebar lasan (mm), dan sumbu z yaitu power (W). Untuk mendapatkan nilai lebar lasan yang minimum, *welding speed* (m/min) dan power (W) yang dapat diinput adalah seperti pada Gambar 4.42. Yaitu *welding speed* 3,3150 m/min dan power input 2000 W. Analisa ini menggunakan fitur *responses optimizer* pada Minitab17.



Surface Plot of Lebar Lasan (mm) vs Power (W); Welding Speed (m/min)



Gambar 4. 41 Surface Plot Simulasi Lebar Lasan



Gambar 4. 42 Analisa Lebar Lasan Minimum



4.4.2 Analisa RSM Kedalaman Penetrasi

Desain eksperimen untuk menganalisa pengaruh *welding speed* dan power input terhadap kedalaman penetrasi pengelasan laser Esshete 1250 dibuat seperti pada Tabel 4.7. Tabel ini mendistribusikan angka *Std Order*, *Run Order*, *Blocks*, dan *Pt Type* sesuai dengan jenis analisa data yaitu *DOE Response Surface Methodology*. *Respons* yang digunakan adalah Kedalaman Penetrasi (mm) kemudian faktor yang digunakan ada dua yaitu *welding speed* dan power input.

Tabel 4. 5 Desain Eksperimen dan Analisis Data Kedalaman Penetrasi

Std Order	Run Order	Blocks	Pt Type	WS (m/min)	P (W)	KP (mm)
1	1	1	1	2,5	2000	0,88
2	2	1	1	2,5	2250	0,8842
3	3	1	1	2,5	2500	0,92
4	4	1	1	2,5	2750	0,9
5	5	1	1	3	2000	0,78
6	6	1	1	3	2250	0,8308
7	7	1	1	3	2500	0,8432
8	8	1	1	3	2750	0,8714
9	9	1	1	3,5	2000	0,7692
10	10	1	1	3,5	2250	0,7941
11	11	1	1	3,5	2500	0,7875
12	12	1	1	3,5	2750	0,8211

Keterangan :

WS : *Welding Speed* (m/min)

P : Power Input Laser (W)

KP : Kedalaman Penetrasi (mm)



Analisa RSM menghasilkan persamaan regresi sebagai berikut :

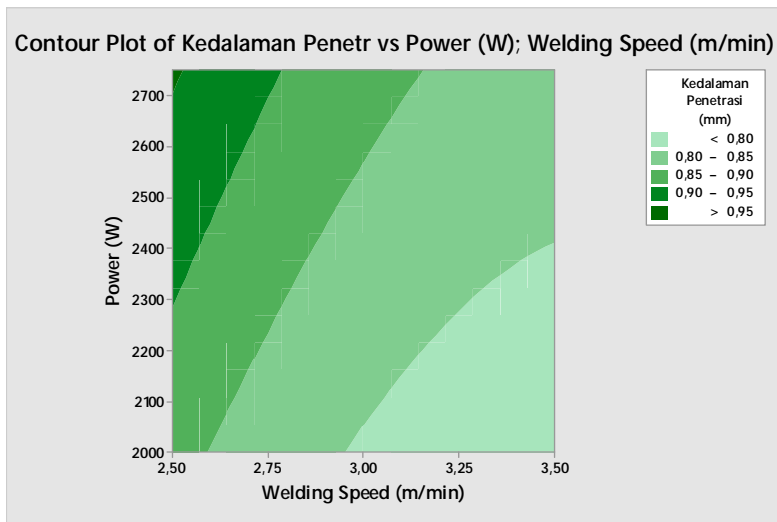
$$\begin{aligned} \text{Kedalaman Penetrasi (mm)} = & 1,484 - 0,563X_1 \\ & + 0,000207X_2 \\ & + 0,0920X_1^2 \\ & + 0,000000X_2^2 \\ & - 0,000043X_1X_2 \quad \dots\dots\dots(4.2) \end{aligned}$$

Dimana,

X_1 = *Welding Speed* (m/min)

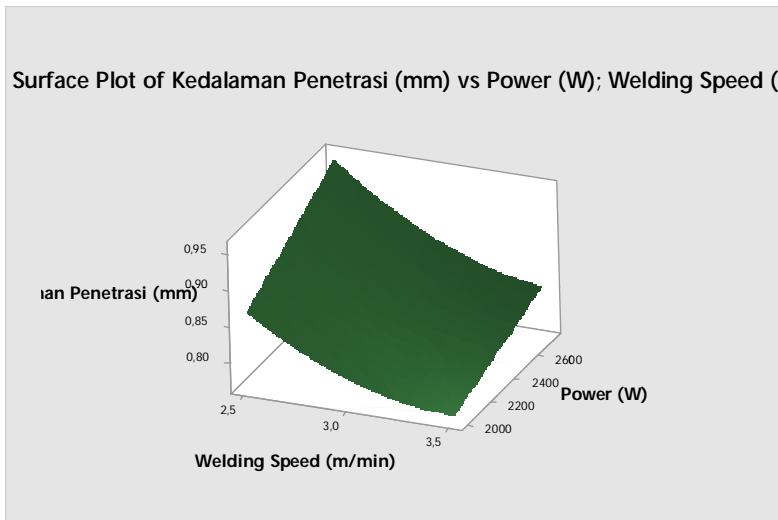
X_2 = *Power* (W)

Persamaan (4.2) merumuskan pengaruh *welding speed* dan *power* terhadap kedalaman penetrasi. Seberapa besar pengaruhnya, dan bagaimana seharusnya besar *welding speed* dan *power* yang sesuai dengan kondisi optimal yaitu kedalaman penetrasi yang maksimum. Untuk melihatnya lebih jelas, analisa RSM pada kedalaman penetrasi dapat di plot menggunakan *contour plot* seperti pada Gambar 4.43.

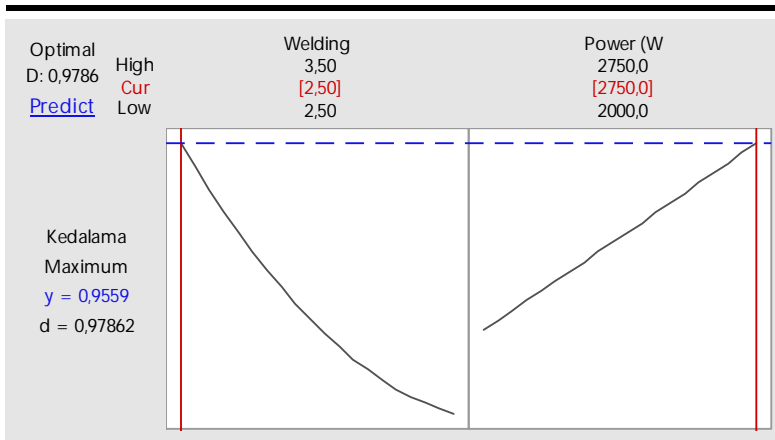


Gambar 4. 43 *Contour Plot* RSM Kedalaman Penetrasi

Gambar 4.43 memperlihatkan *contour plot* berdasarkan warna yang berbeda-beda. Warna hijau tua memperlihatkan kedalaman penetrasi lebih dari 0,95 mm dan warna hijau muda memperlihatkan kedalaman penetrasi kurang dari 0,80 mm. Masing-masing warna dipengaruhi oleh dua faktor input dimana *welding speed* berada dalam sumbu x dan power input berada dalam sumbu y. Gambar 4.44 menggambarkan *surface plot* dari semua simulasi kedalaman penetrasi. Untuk mendapatkan nilai kedalaman penetrasi yang maksimum, maka *welding speed* (m/min) dan power (W) yang dapat diinput adalah seperti pada Gambar 4.45. Yaitu *welding speed* 2,5 m/min dan power input 2750 W.



Gambar 4. 44 *Surface Plot* Simulasi Kedalaman Penetrasi



Gambar 4. 45 Analisa Kedalaman Penetrasi Maksimum

4.4.3 Analisa RSM Tegangan Sisa

Desain eksperimen untuk menganalisa pengaruh *welding speed* dan power input terhadap tegangan sisa pengelasan laser Esshete 1250 dibuat seperti pada Tabel 4.8. Tabel ini mendistribusikan angka *Std Order*, *Run Order*, *Blocks*, dan *Pt Type* sesuai dengan jenis analisa data yaitu *DOE Response Surface Methodology*. *Respons* yang digunakan adalah Tegangan Sisa (Pa) kemudian faktor yang digunakan ada dua yaitu *welding speed* dan power input.



Tabel 4. 6 Desain Eksperimen dan Analisis Data Tegangan Sisa

Std Order	Run Order	Blocks	Pt Type	WS (m/min)	P (W)	TS (Pa)
1	1	1	1	2,5	2000	0,20444
2	2	1	1	2,5	2250	0,20486
3	3	1	1	2,5	2500	0,20532
4	4	1	1	2,5	2750	0,20584
5	5	1	1	3	2000	0,20393
6	6	1	1	3	2250	0,20429
7	7	1	1	3	2500	0,20476
8	8	1	1	3	2750	0,20529
9	9	1	1	3,5	2000	0,19931
10	10	1	1	3,5	2250	0,19975
11	11	1	1	3,5	2500	0,20023
12	12	1	1	3,5	2750	0,20077

Keterangan :

WS : *Welding Speed* (m/min)

P : Power Input Laser (W)

TS : Tegangan Sisa (Pa)

Analisa RSM menghasilkan persamaan regresi sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\text{Tegangan Sisa (Pa)} = & 0,146636 \\ & + 0,042770X_1 \\ & - 0,000001X_2 \\ & - 0,008010X_1^2 \\ & + 0,000000X_2^2 \\ & + 0,000000X_1X_2 \dots\dots\dots(4.3)\end{aligned}$$

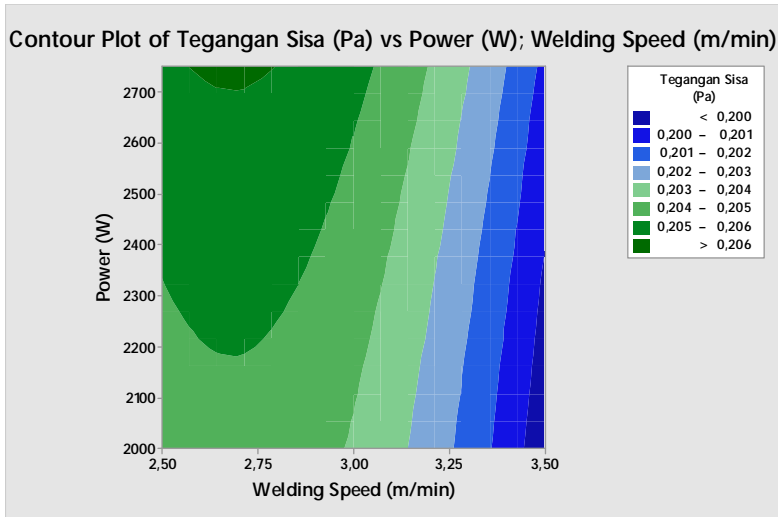
Dimana,

X_1 = *Welding Speed* (m/min)

X_2 = Power (W)

Persamaan (4.3) merumuskan pengaruh *welding speed* dan power terhadap tegangan sisa. Seberapa besar pengaruhnya, dan bagaimana seharusnya besar *welding speed* dan power yang sesuai dengan kondisi optimal yaitu tegangan sisa yang minimum. Untuk melihatnya lebih jelas, analisa RSM pada tegangan sisa

dapat di plot menggunakan *contour plot* seperti pada Gambar 4.46.

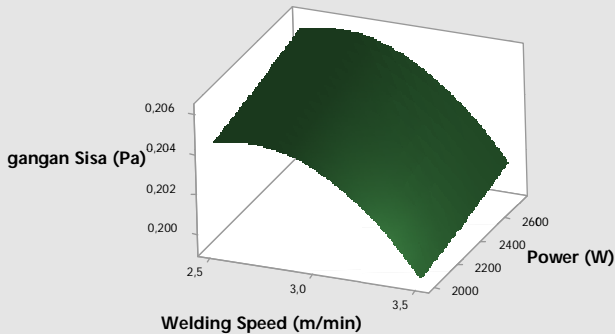


Gambar 4. 46 *Contour Plot* RSM Tegangan Sisa

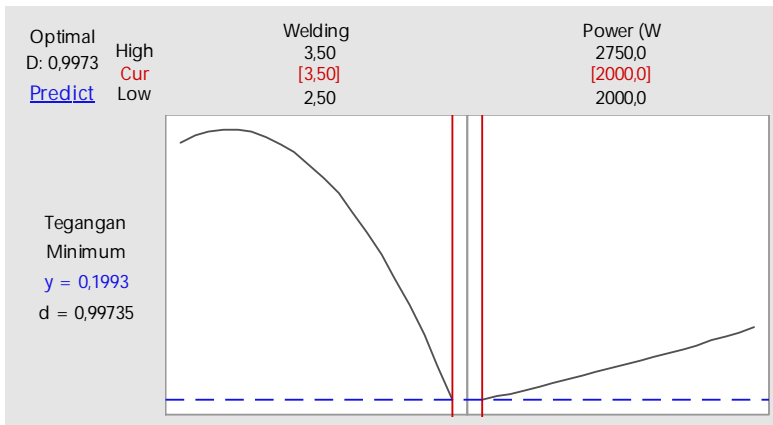
Gambar 4.46 memperlihatkan *contour plot* berdasarkan warna yang berbeda-beda. Warna hijau tua memperlihatkan tegangan sisa lebih dari 0,206 Pa dan warna biru tua memperlihatkan tegangan sisa kurang dari 0,20 mm. Masing-masing warna dipengaruhi oleh dua faktor input dimana *welding speed* berada dalam sumbu x dan power input berada dalam sumbu y. Pada Gambar 4.47 terlihat *surface plot* yang didapatkan dari simulasi untuk menunjukkan tegangan sisa pengelasan laser. Untuk mendapatkan nilai kedalaman penetrasi yang maksimum, *welding speed* (m/min) dan power (W) sesuai dengan Gambar 4.48. Yaitu *welding speed* sebesar 3,5 m/min dan power input sebesar 2000 W.



Surface Plot of Tegangan Sisa (Pa) vs Power (W); Welding Speed (m/min)



Gambar 4. 47 Surface Plot Simulasi Tegangan Sisa



Gambar 4. 48 Analisa Tegangan Sisa Minimum

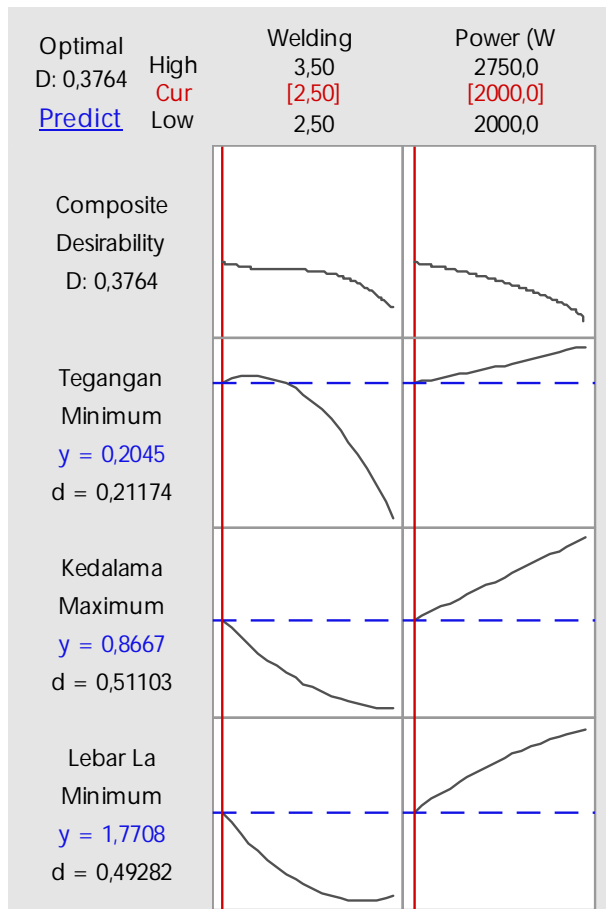
4.4.4 Hasil Analisa RSM Lebar Lasan, Kedalaman Penetrasi dan Tegangan Sisa

Dari Gambar 4.41, Gambar 4.43, dan Gambar 4.45 didapatkan grafik optimasi yang berbeda-beda sesuai dengan hasil



contour plot yang ada. Gambar 4.41 dianalisa dengan *meminimize* lebar lasan dan mengatur *do not optimize* pada respon kedalaman penetrasi dan tegangan sisa. Pada Gambar 4.43, analisa dilakukan dengan *memaximize* kedalaman penetrasi dan mengatur *do not optimize* pada respon lebar lasan dan tegangan sisa. Begitu juga pada Gambar 4.45, dilakukan analisa dengan proses yang sama. Yaitu dengan *meminimize* tegangan sisa dan mengatur *do not optimize* pada respon lebar lasan dan kedalaman penetrasi.

Untuk mengetahui optimasi pada tiga respon yang berbeda sekaligus dapat dilakukan dengan mengatur optimasi dimana lebar lasan *minimize*, kedalaman penetrasi yang *maximize*, dan tegangan sisa *minimize*. Hasil dari optimasi ini untuk mengetahui *welding speed* (m/min) dan power (W) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.46. Untuk menghasilkan hasil yang paling optimal adalah dengan menginput *welding speed* sebesar 2,5 m/min dan power input 2000 W.



Gambar 4. 49 Optimasi *Response* Pengelasan Laser Esshete 1250

4.5 Validasi Hasil Simulasi

Validasi diperlukan untuk membenarkan hasil simulasi yang dilakukan oleh aplikasi khususnya ANSYS Workbench *Transient Thermal* yang menunjukkan lebar lasan dan kedalaman penetrasi lasan Esshete 1250 dan juga pada ANSYS Workbench *Transient Structural* yang menunjukkan adanya tegangan sisa yang



terjadi setelah terjadinya pengelasan. Validasi dilakukan dengan pembuktian perhitungan matematis terhadap parameter input berupa *welding speed* dan power dan hubungannya dengan respon output berupa lebar lasan, kedalaman penetrasi, dan tegangan sisa. Validasi dilakukan dengan menghitung *peak temperatur* matematis dari input power sebesar 2000 W dan *welding speed* 2,5 m/min.

$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\sqrt{2\pi e} \rho C h Y_Z}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0} \dots \dots \dots (4.4)$$

(AWS Vol 1, 2001)

Dimana,

- T_p = Peak Temperatur;
- T_0 = Temperatur awal;
- π = 3,1416;
- e = 2,718;
- ρ = Densitas logam induk;
- C = Spesific heat;
- h = Ketebalan benda kerja;
- Y_Z = Jarak garis HAZ dari pusat *weld pool*;
- H_{net} = Net heat input per satuan panjang; dan
- T_m = Temperatur leleh.

Dari persamaan 4.4, dapat diketahui temperatur maksimum yang akan dihasilkan apabila telah diketahui lebar lasan yang dihitung dari hasil simulasi pertama. Dari simulasi 1 dengan power 2000 W dan *welding speed* 2,5 m/min diketahui hasil simulasi memiliki lebar lasan 1,7647 mm atau 0,17647 cm dan denhan jarak garis HAZ dari pusat *weld pool* sebesar 0,088235 cm. Dengan temperatur awal material 300 K, densitas logam sebesar 7,9 g/cm³, temperatur leleh 1673 K, *specific heat* sebesar 0,4 J/g. K, dan H_{net} sebesar 480 J/cm maka akan didapatkan temperatur maksimum logam sebesar :



$$\frac{1}{T_p - T_0} = \frac{\sqrt{2\pi e} \rho C h Y_z}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_0}$$

$$\frac{1}{T_p - 300 K} = \frac{4,13 \cdot 7,9 \cdot \frac{g}{cm^3} \cdot 0,4 \cdot \frac{J}{gK} \cdot 0,3 cm \cdot 0,088235 cm}{480 J/cm} + \frac{1}{1673 K - 300 K}$$

$$\frac{1}{T_p - 300 K} = 0,0007198332 K^{-1} + 0,0007283321 K^{-1}$$

$$\frac{1}{T_p - 300 K} = 0,0014481653 K^{-1}$$

$$T_p - 300 K = 690,5289 K$$

$$T_p = 690,5289 K + 300 K$$

$$T_p = 990.52 K$$

Temperatur maksimum pada daerah HAZ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 adalah temperatur 1400 K. Pada Gambar 4.4, temperatur 1000 K adalah temperatur diluar HAZ (1400 K) yang berada pada node 0,088235 cm dari *weld pool*. Hal ini menggambarkan bahwa hasil simulasi sesuai dengan hasil perhitungan matematis karena hanya memiliki selisih sebesar 9,48 K (0,948 % error). Keakuratan perhitungan dipengaruhi oleh kecilnya proses *meshing*. Seharusnya proses *meshing* sekecil mungkin sehingga elemen yang dijadikan acuan perhitungan lebar lasan juga lebih tepat posisinya. Validasi juga dapat dihitung dengan persamaan (4.5) yang menggambarkan hubungan kedalaman penetrasi, konduktivitas termal, power input, diameter fokus laser, dan *welding speed*.

$$h = \frac{P}{\rho D v [c(T_m - T_0) + L_m]} \dots\dots\dots (4.5)$$

(Xin Xue, 2017)



dimana,

P = Power for Melting;

ρ = Densitas;

D = Diameter Laser;

h = Kedalaman Penetrasi;

v = Welding Speed;

C = Spesific Heat;

T_m = Temperatur Leleh;

T_0 = Temperatur Awal; dan

L_m = Latent Heat of Melting.

$$h = \frac{P}{\rho D v [c(T_m - T_0) + L_m]}$$

$$h = \frac{2000 \text{ W}}{7960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,0006 \text{ m} \times 0,0417 \frac{\text{m}}{\text{s}} \left[400 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (1637 \text{ K} - 300 \text{ K}) + 10743223 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]}$$

$$h = \frac{2000 \text{ W}}{0,1991592 \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \times 11278023 \frac{\text{J}}{\text{kg}}}$$

$$h = \frac{2000 \text{ W}}{2246122,0382616 \frac{\text{J}}{\text{ms}}}$$

$$h = 0,00089042 \text{ m}$$

$$h = 0,89042 \text{ mm}$$

Kedalaman penetrasi dalam perhitungan simulasi adalah 0,88 mm sementara pada perhitungan matematis adalah sebesar 0,89042 mm. Dari kedua nilai ini dapat dilihat terdapat selisih sebesar 0,01042 mm atau eror sebesar 1,184 %. Eror yang terjadi sangatlah kecil sehingga hasil simulasi kedalaman penetrasi nilainya akurat jika dibandingkan dengan nilai matematis.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. *Heat flux* yang semakin tinggi dapat meningkatkan lebar lasan, meningkatkan kedalaman penetrasi, dan meningkatkan tegangan sisa
2. *Welding speed* yang semakin tinggi dapat mengurangi lebar lasan, mengurangi kedalaman penetrasi dan mengurangi tegangan sisa
3. Hasil pengelasan yang optimal akan didapatkan pada power sebesar 2000 W yang menghasilkan *heat flux* 7077140835 W/m² dan *welding speed* 2,5 m/min dengan eror 0,948 % pada lebar lasan dan 1,184 % pada kedalaman penetrasi jika dibandingkan dengan nilai validasi.

5.2 Saran

1. Meshing yang digunakan pada geometri permodelan akan semakin akurat dengan *meshing* yang lebih halus.
2. Memahami proses analisa yang dilakukan oleh ANSYS Workbench secara pasti agar tidak terjadi perbedaan persepsi antara penyusun dan software



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- A. Georgeta, S. Gheorghe, I. Danut. 2012. **Input Parameters Influence on The Residual Stress and Distortions at Laser Welding Using Finite Element Analysis**. UPB Scientific Buletin Series D, 74 (2)
- Ahn J., E. He, L. Chen, T. Pirling, J.P. Dear, dan C. M. Davies. 2017. **Materials Science & Engineering**. France : Institut Laue Langevin
- Alcock J.A. & Baufeld B. 2016. **Diode Laser Welding of Stainless Steel 304L**. UK : University of Sheffield
- ANSYS, Inc. 2013. **ANSYS Mechanical APDL Verification Manual**. USA : United States Government
- Becker Jr., R. M. Cannon, dan R.O. Ritchie. 1999. **An Approximate Method for Residual Stress Calculation in Functionally Graded Materials**. Barkeley : University f California
- Bhadra R., Biswas P. & M. Ravi S. 2014. **Effect of Process Parameters on Thermal History of Laser Welding of AISI-304 Stainless Steel**. India : IIT Guwahati
- Casalino G., P. Guglielmi, V.D. Lorusso, M. Mortello, P. Peyre & D. Sorgente. 2016. **Laser Offset Welding of AZ31B Magnesium Alloy to 316 Stainess Steel**. Italy : Politecnico di Bari
- Chong E. K. P & Zak S. H. 2001. **An Introduction to Optimization**. Edisi Kedua. Canada
- Cynthia L. Jenney dan Annette O'Brien. 2001. **AWS Handbook Vol 1 : Welding Science and Technology**
- Dani, Rahmad. **Pengaruh Variasi Kecepatan Pengelasan Tungsten Inert Gas (TIG) terhadap Kekuatan Tarik Hasil Sambungan Las pada Baja Karbon Rendah (ST 41)**. Lampung : Fakultas Teknik Universitas Lampung
- Eriksson, Ingemar. 2011. **Optical Monitoring and Analysis of Laser Welding**. Sweden : Lulea University of Technology

- Gang Zheng, Sayeed Hossain, Ed Kingston, dan hristoper. 2017. **An Optimisation Study of The Modofied Deep-Hole Drilling Technique Using Finite Element Analyses Applied to A Stainless Steel Ring Welded Circular Disc.** Oman : Millitary Technological College
- Jiang P., Chaochao W., Qi Z., Xinyu S., Leshi S. & Xiongbín L. 2016. **Optimization of Laser Welding Process Parameters of Stainless Steel 316L Using FEM, Kriging and NSGA-II.** China : University of Science and Technology
- Jennney, A.O. 2001. **Welding Science and Technology.** Edisi 9 Volume 1. America : American Welding Society
- Kumar N., Manidipto M., & Asish B. 2016. **Comparative Study of Pulsed Nd:YAG Laser Welding of AISI 204 and 316 Stainless Steels.** India : Jadavpur University
- Kumar N., Manidipto M. & Asish B. 2017. **Study on Laser Welding of Austenitic Stainless Steel by Vaying Incident Angle of Pulsed Laser Beam.** India : Jadavpur University
- Logan, D.L. 2010. **A First Course in The Finite Element Method.** Edisi kelima. Platteville : University of Wisconsin
- Mutiara E., Tri Y., Dedi H., dan Djoko K. 1998. **Pengaruh Parameter Proses Pengelasan Terhadap Karakteristik Hasil Las dengan *Resistance Welding Machine*.** Jakarta
- Na, Xiaodong. 2010. **Laser Welding : Techniques of Real Time Sensing and Control Development.** Europe : Intech
- Ragavendran M., N. Chandrasekhar, R. Ravikumar., Rajesh S. & M. Vasudevan. 2017. **Optimization of Hybrid Laser – TIG Welding of 316LN Steel Using Response Surface Methodology (RSM).** India : Bhabha National Institute
- Sandvik. 2017. **Esshete 1250 : Tube and Pipe.**
- Siang, Jong Jek. 2011. **Riset Operasi dalam Pendekatan Algoritmis.** Diterjemahkan oleh Sigit Suyantoro. Yogyakarta : C.V Andi Offset

- Sonawan H. Dan Rochim S. 2006. **Pengantar untuk Memahami Proses Pengelasan Logam**. Bandung : Alfabeta
- Sundqvist, Jesper. 2015. **Heat Conduction Effects During Laser Welding**. Sweden : Lulea University of Technology
- Widharto, Sri. 2006. **Petunjuk Kerja Las**. Jakarta : Pradnya Paramita
- Wirjosumarti, Okumura & Harsono Prof. 1998. **Teknologi Pengelasan Logam**. Jakarta : PT. Pradnya Paramitha.
- Xin Xue. 2017. **Effect of Pulsed Nd:YAG Laser Welding Parameters on Penetration and Microstructure Characterization of a DP1000 Steel Butt Joint**. China : School of Mechanical Engineering and Automation
- Yilbas, Bekir. 2013. **Laser Forming and Welding Processes**. Switzerland : Springer International Publishing
- Zheng G., Sayeed H., Ed K., Christopher E., Truman & David J. S. 2017. **An Optimization Study of The Modified Deep-Hole Drilling Technique Using Finite Element Analyses Applied to A Stainless Steel Ring Welded Circular Disc**. UK : University of Bristol
- Zwilsky K. M. 1980. **ASM Handbook Volume 1 : Properties and Selection : Irons Steels and High Performance Alloys**.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

I. *Solution Information Load Step 1 Substep 1* pada Pembebanan Termal

LOAD STEP NUMBER. 2
TIME AT END OF THE LOAD STEP. 0.55200E-
01
NUMBER OF SUBSTEPS. 10
MAXIMUM NUMBER OF EQUILIBRIUM ITERATIONS. . .
. 15
STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS YES
TRANSIENT (INERTIA) EFFECTS
THERMAL DOFS ON
TRANSIENT INTEGRATION PARAMETERS
THETA. 1.0000
OSCILLATION LIMIT CRITERION. 0.50000
TOLERANCE. 0.0000
TERMINATE ANALYSIS IF NOT CONVERGED YES
(EXIT)
CONVERGENCE CONTROLS
LABEL REFERENCE TOLERANCE NORM MINRE
F
HEAT 0.000 0.5000E-02 2 0.1000E-05
TEMP 3500. 0.5000E-02 2 -1.000
PRINT OUTPUT CONTROLS NO PRINTOUT
DATABASE OUTPUT CONTROLS
ITEM FREQUENCY COMPONENT
ALL NONE
NSOL ALL
RSOL ALL
FFLU ALL
MISC ALL _ELMISC

SOLUTION MONITORING INFO IS WRITTEN TO FILE=
file.mntr

HT FLOW CONVERGENCE
VALUE= 39.64 CRITERION= 6.302
TEMP CONVERGENCE VALUE =
0.1061E+06 CRITERION= 17.50
EQUIL ITER 1 COMPLETED. NEW TRIANG
MATRIX. MAX DOF INC= 6163.
HT FLOW CONVERGENCE
VALUE= 23.86 CRITERION= 6.373
TEMP CONVERGENCE VALUE =
0.2323E+05 CRITERION= 17.50
EQUIL ITER 2 COMPLETED. NEW TRIANG
MATRIX. MAX DOF INC= -2010.
HT FLOW CONVERGENCE
VALUE= 1.193 CRITERION= 6.284 <<< CONVERGED
TEMP CONVERGENCE
VALUE = 2305. CRITERION= 17.50
EQUIL ITER 3 COMPLETED. NEW TRIANG
MATRIX. MAX DOF INC= -209.1
HT FLOW CONVERGENCE VALUE= 0.9665E-
01 CRITERION= 6.282 <<< CONVERGED
TEMP CONVERGENCE
VALUE = 153.3 CRITERION= 17.50
EQUIL ITER 4 COMPLETED. NEW TRIANG
MATRIX. MAX DOF INC= 6.401
HT FLOW CONVERGENCE VALUE= 0.1110E-
01 CRITERION= 6.282 <<< CONVERGED
TEMP CONVERGENCE
VALUE = 11.81 CRITERION= 17.50 <<<
CONVERGED
EQUIL ITER 5 COMPLETED. NEW TRIANG
MATRIX. MAX DOF INC = -0.7330
>>> SOLUTION CONVERGED AFTER EQUILIBRIUM

ITERATION 5

*** LOAD STEP 2 SUBSTEP 1 COMPLETED. CUM
ITER = 45

*** TIME = 0.120000E-01 TIME INC = 0.480000E-02

*** RESPONSE EIGENVALUE = 23.19 OSCILLATION
LIMIT = 0.1113

II. *Solution Information Load Step 1* pada *Pembebanan Struktural*

PROBLEM DIMENSIONALITY.3-D
DEGREES OF FREEDOM. UX UY UZ
ANALYSIS TYPETRANSIENT
SOLUTION METHOD.FULL
OFFSET TEMPERATURE FROM ABSOLUTE ZERO
273.15
NONLINEAR GEOMETRIC EFFECTSON
EQUATION SOLVER OPTION.
.SPARSE
NEWTON-RAPHSON OPTIONPROGRAM
CHOSEN
GLOBALLY ASSEMBLED MATRIX
.SYMMETRIC

*** NOTE *** CP = 9.812 TIME=
10:18:26

This nonlinear analysis defaults to using the full Newton-Raphson solution procedure. This can be modified using the NROPT command.

*** NOTE *** CP = 9.812 TIME=
10:18:26

The conditions for direct assembly have been met. No .emat or

.erot
files will be produced.

*** NOTE *** CP = 13.447 TIME=
10:18:30

It is highly recommended to use the auto contact setting option
by
issuing CNCHECK,AUTO command for this problem in order to
achieve
better convergence.

*** NOTE *** CP = 13.447 TIME=
10:18:30

Symmetric Deformable- deformable contact pair identified by
real
constant set 103 and contact element type 103 has been set
up. The
companion pair has real constant set ID 104. Both pairs should
have
the same behavior.

ANSYS will deactivate the current pair and keep its companion
pair,
resulting in asymmetric contact.

Contact algorithm: Augmented Lagrange method
Contact detection at: Gauss integration point
Contact stiffness factor FKN 10.000
The resulting initial contact stiffness 0.18944E+18
Default penetration tolerance factor FTOLN 0.10000
The resulting penetration tolerance 0.21622E-04
Default opening contact stiffness OPSF will be used.
Default tangent stiffness factor FKT 1.0000
Default elastic slip factor SLTOL 0.50000E-02
The resulting elastic slip 0.17191E-05
Update contact stiffness at each iteration
Default Max. friction stress TAUMAX 0.10000E+21

Average contact surface length	0.34382E-03
Average contact pair depth	0.21622E-03
Default pinball region factor PINB	0.50000
The resulting pinball region	0.10811E-03
Initial penetration/gap is	excluded.
Bonded contact (always) is	defined.

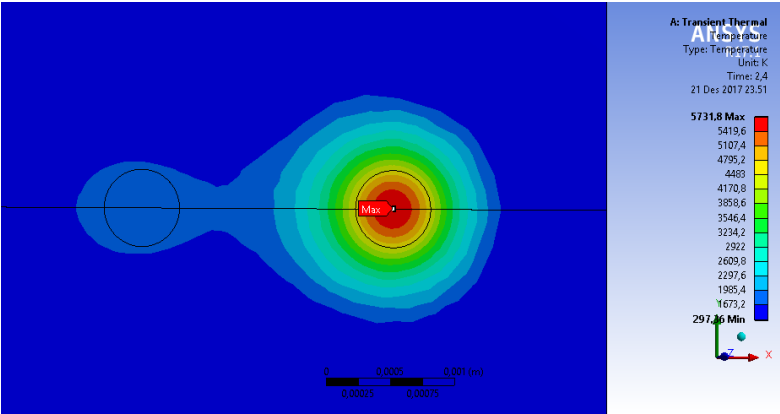
*** NOTE *** CP = 13.447 TIME=10:18:30

Max. Initial penetration 0 was detected between contact element 131896 and target element 140204.

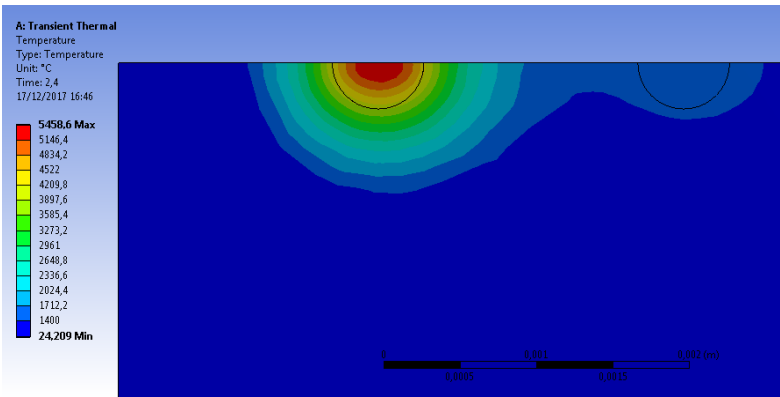
III. Hasil Simulasi Pembebanan Termal

Simulasi 1

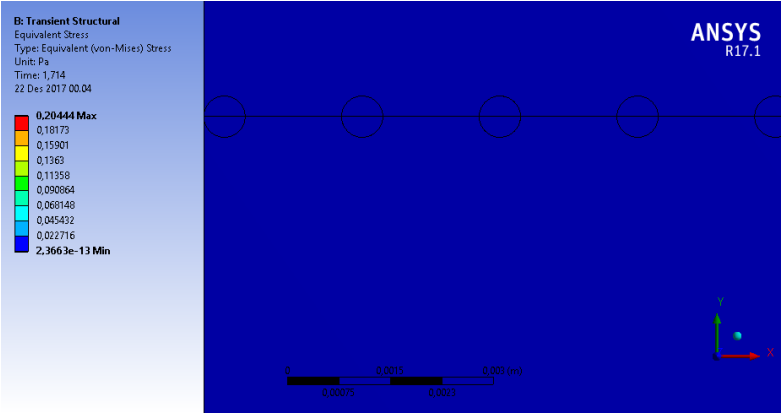
A. Lebar Las



B. Kedalaman Penetrasi

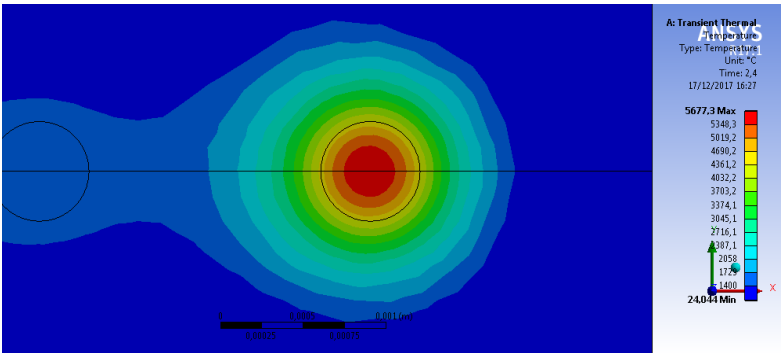


C. Tegangan Sisa

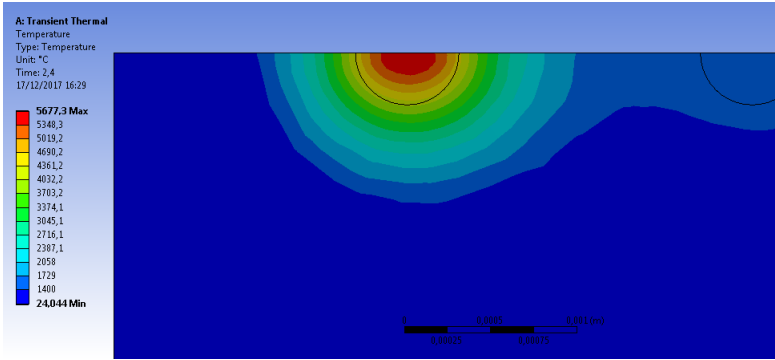


Simulasi 2

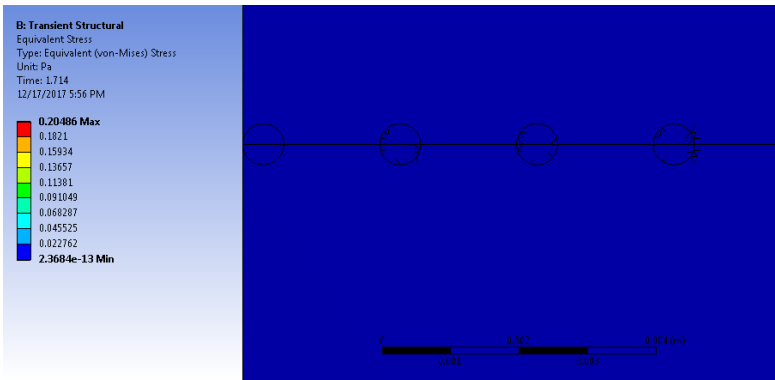
A. Lebar Lasan



B. Kedalaman Penetrasi

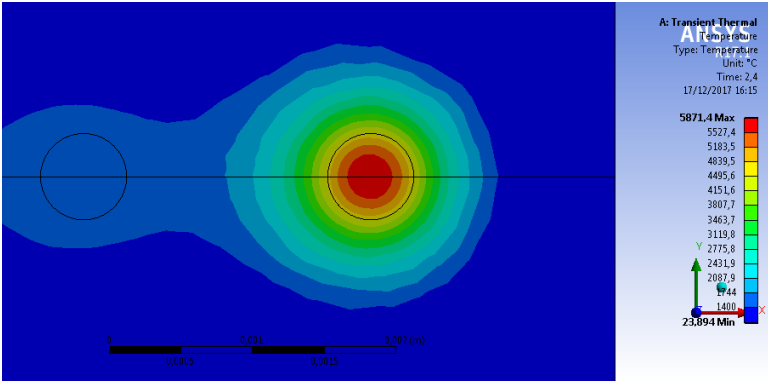


C. Tegangan Sisa

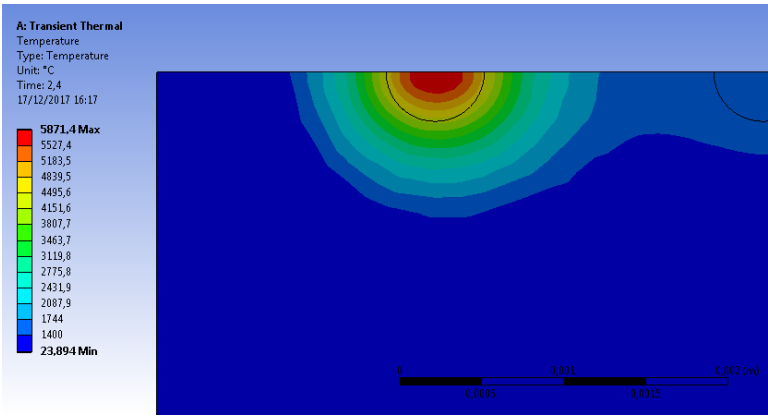


Simulasi 3

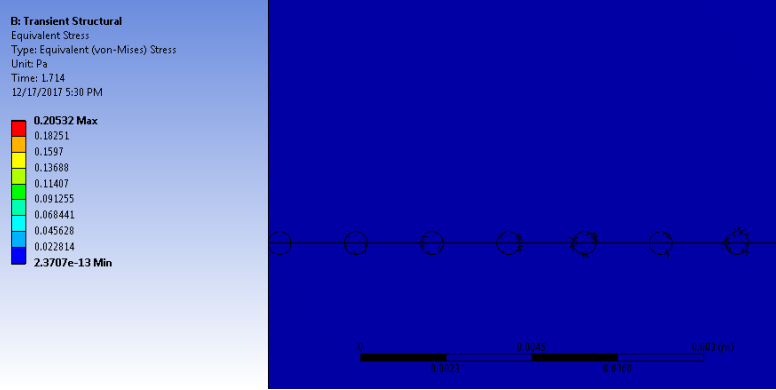
A. Lebar Lasan



B. Kedalaman Penetrasi

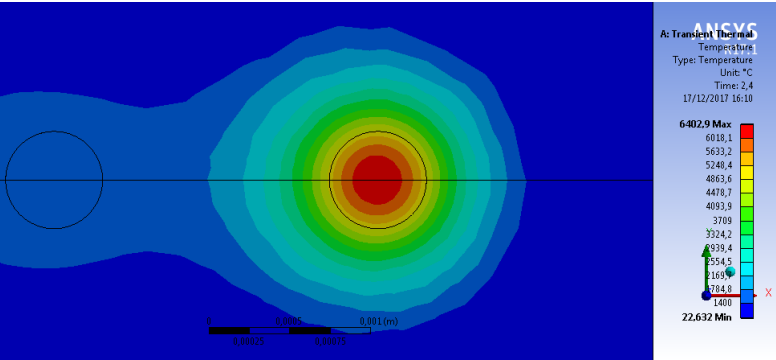


C. Tegangan Sisa

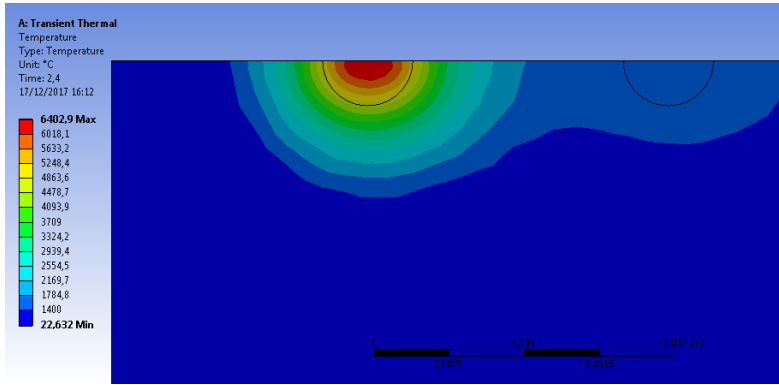


Simulasi 4

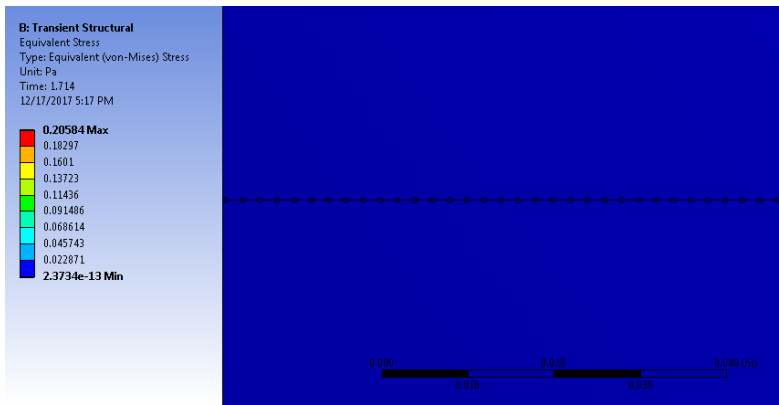
A. Lebar Lasan



B. Kedalaman Penetrasi

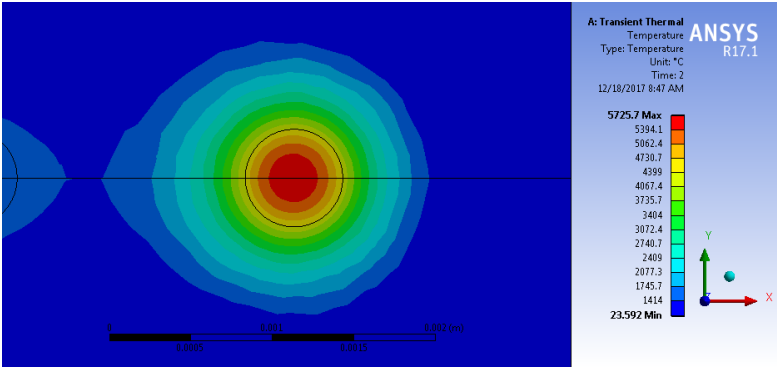


C. Tegangan Sisa

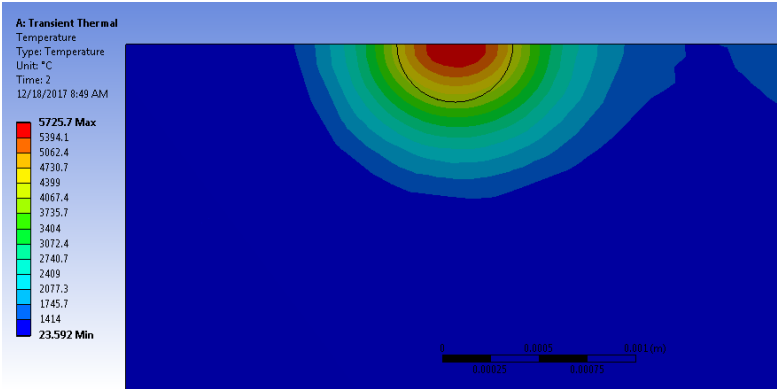


Simulasi 5

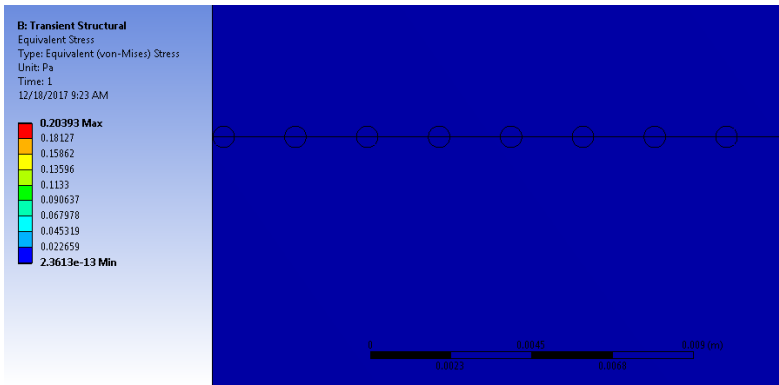
A. Lebar Lasan



B. Kedalaman Penetrasi

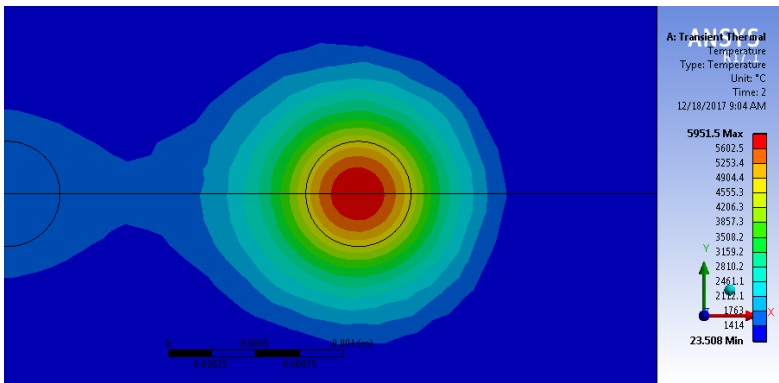


C. Tegangan Sisa

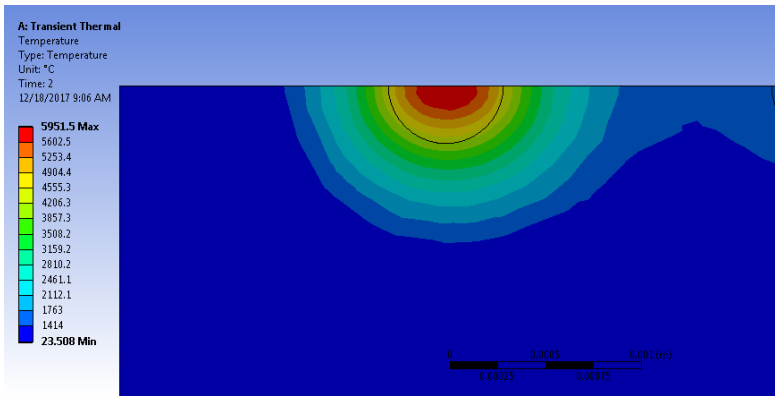


Simulasi 6

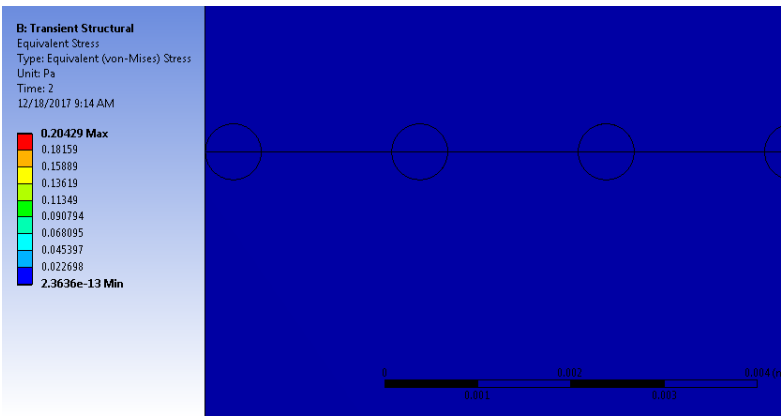
A. Lebar Lasan



B. Kedalaman Penetrasi

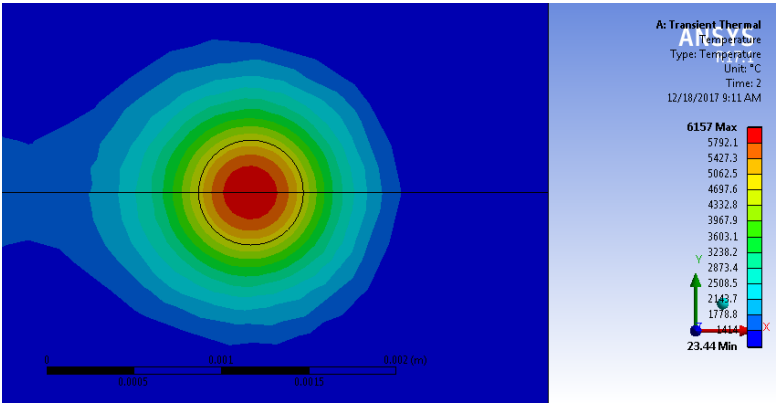


C. Tegangan Sisa

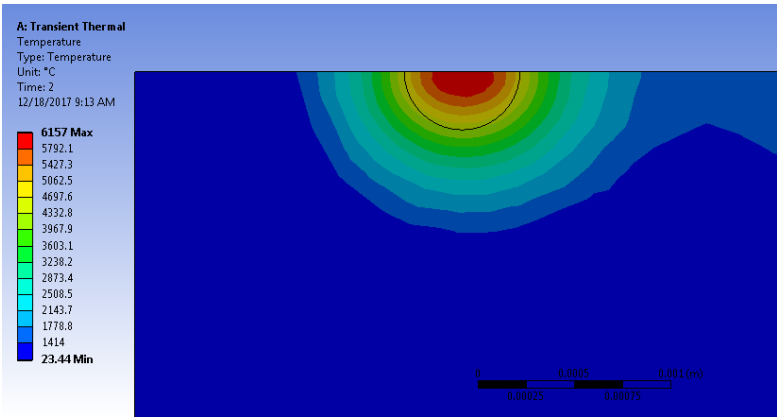


Simulasi 7

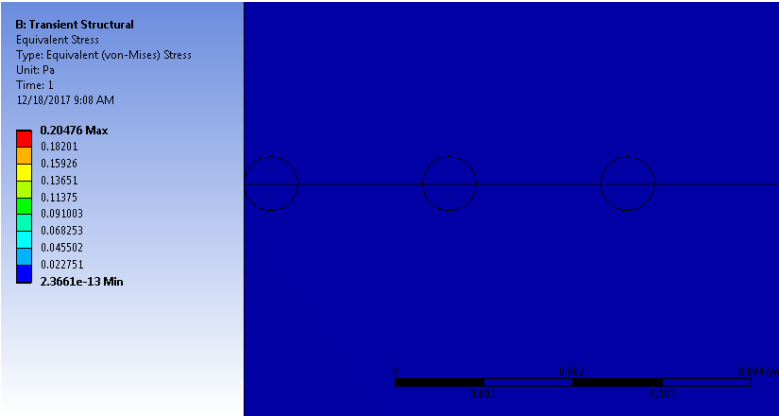
A. Lebar Lasan



B. Kedalaman Penetrasi

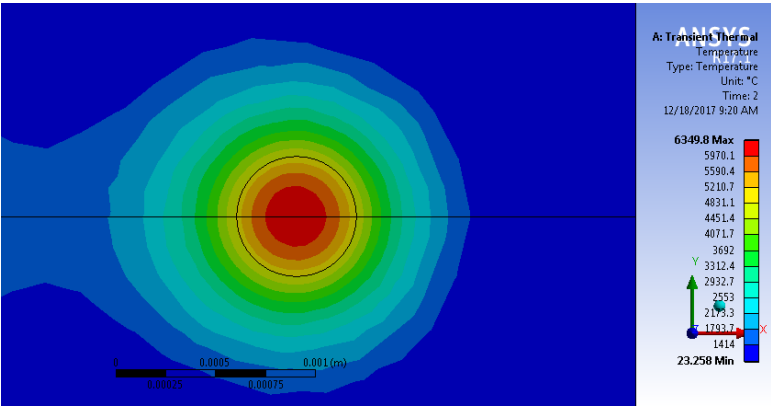


C. Tegangan Sisa

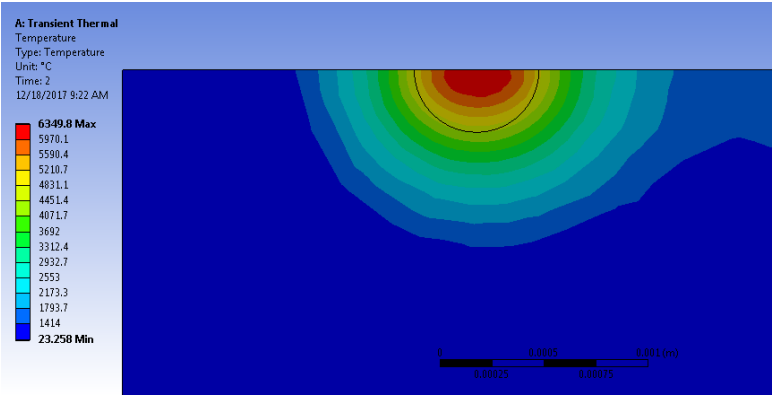


Simulasi 8

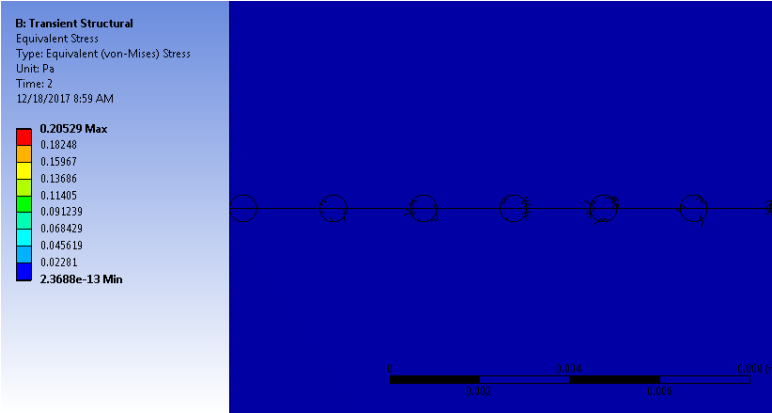
A. Lebar Lasan



B. Kedalaman Penetrasi

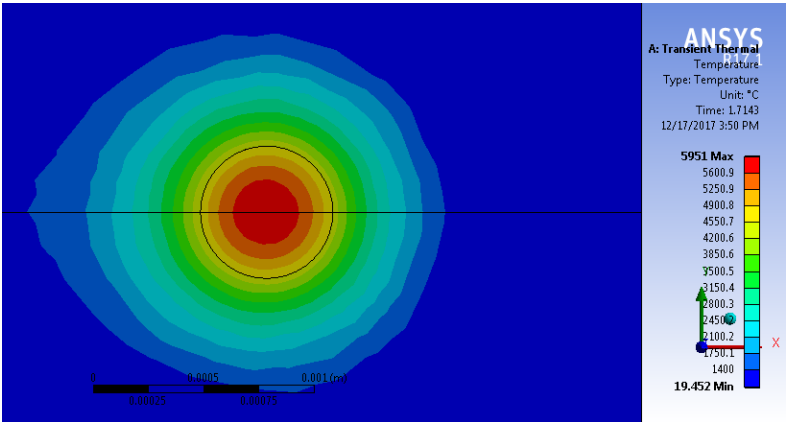


C. Tegangan Sisa

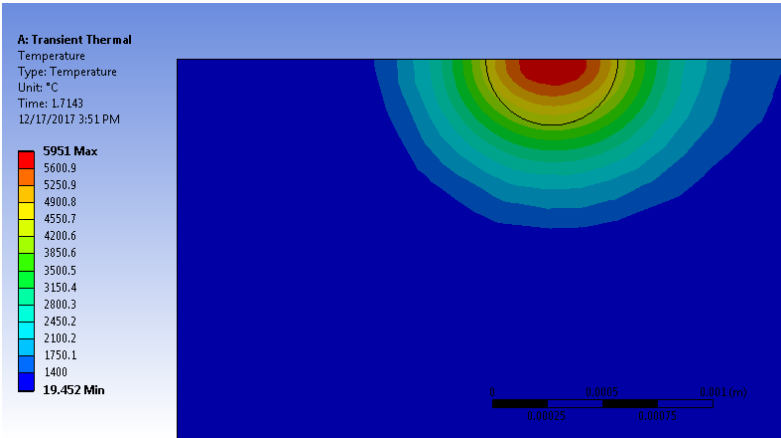


Simulasi 9

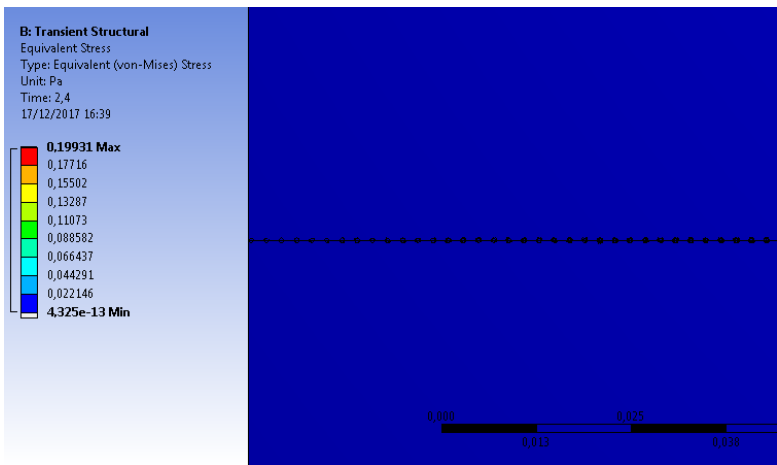
A. Lebar Lasan



B. Kedalaman Penetrasi

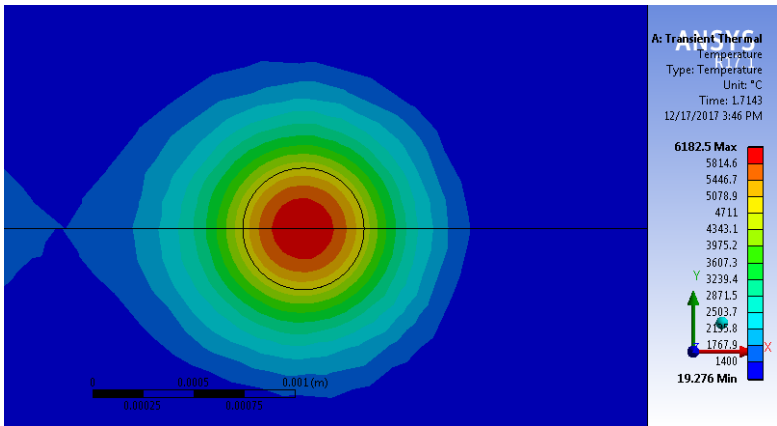


C. Tegangan Sisa

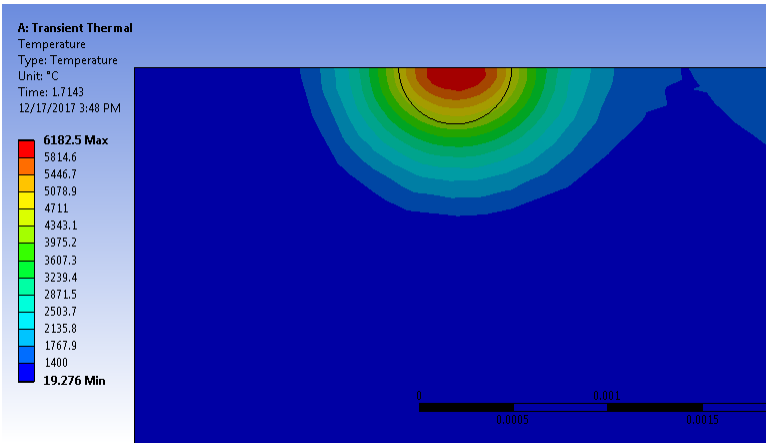


Simulasi 10

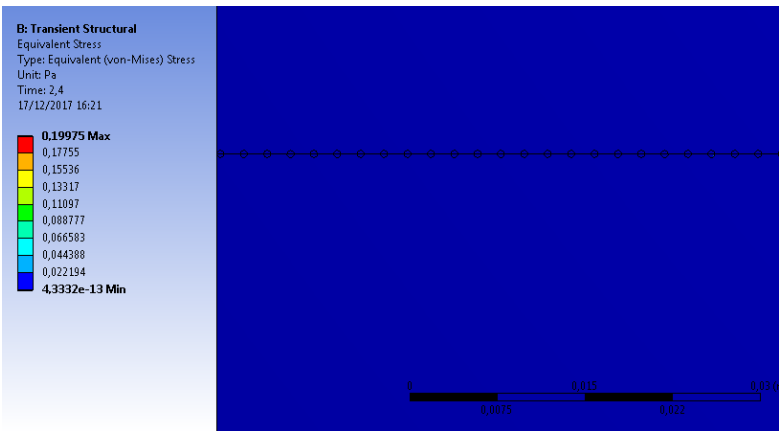
A. Lebar Lasan



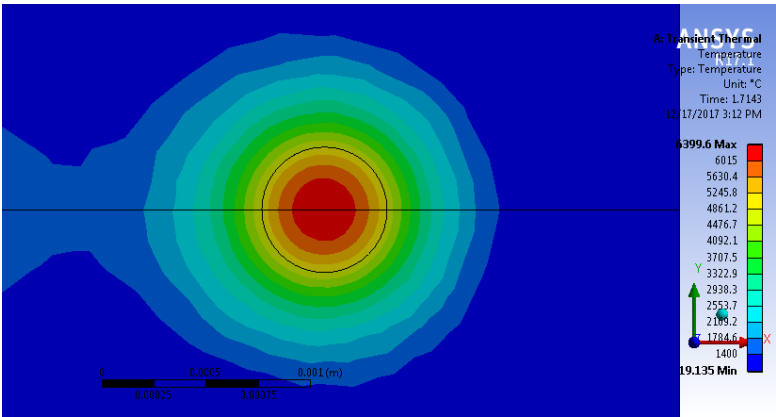
B. Kedalaman Penetrasi



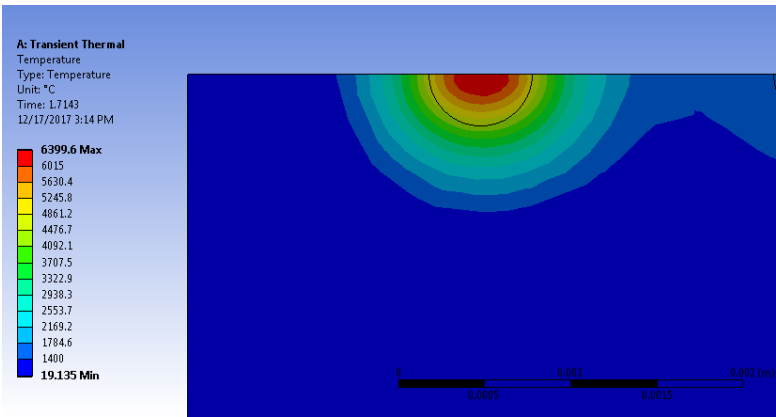
C. Tegangan Sisa



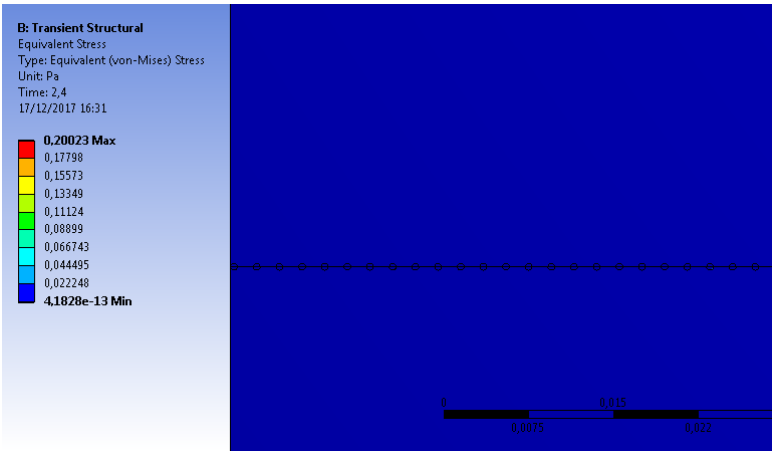
Simulasi 11
A. Lebar Lasan



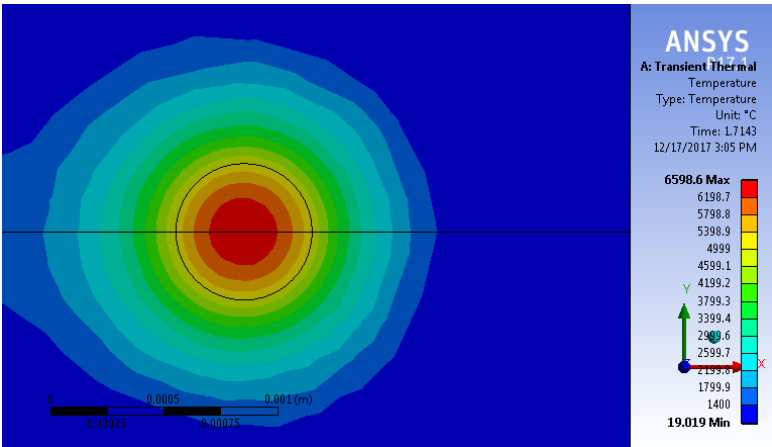
B. Kedalaman Penetrasi



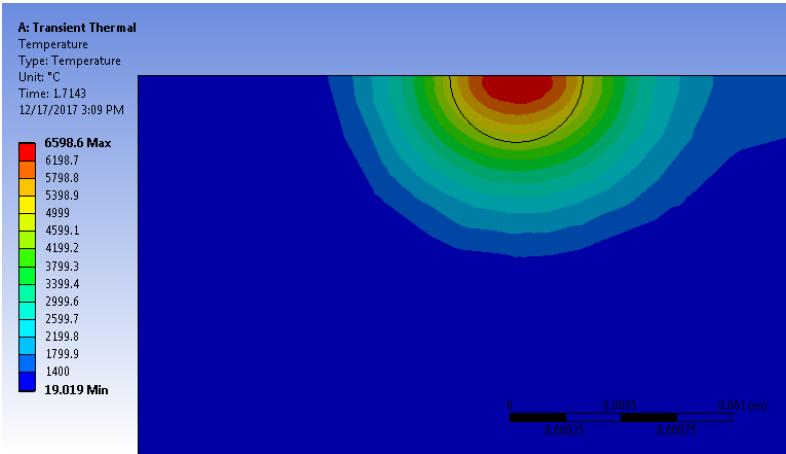
C. Tegangan Sisa



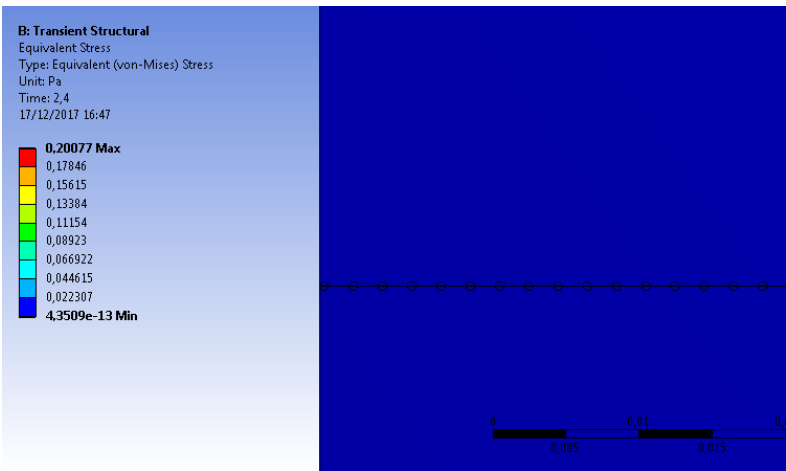
Simulasi 12
A. Lebar Lasan



B. Kedalaman Penetrasi



C. Tegangan Sisa



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan Tugas Akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penyusun dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Mama, Papa, Adek, Mbauti, dan seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, motivasi, dan inspirasi.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, Ph.D dan Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc selalu dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Budi Agung Kurniawan, S.T., M.Sc dan Bapak Ir. Rochman Rochiem., M.Sc yang sudah membantu banyak memberikan ilmu kepada penyusun untuk membantu menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku dosen wali yang sangat mengayomi dan membantu penyusun selama penyusun menjalani pendidikan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
7. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material dan Metalurgi.
8. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penyusun hingga terciptanya laporan Tugas Akhir ini.
9. Sahabat terbaik Rustin Winarsih, Asia, dan Ayu Furoidah yang telah memberikan semangat, dukungan, dan segala bantuan juga menjadi tempat curahan hati penyusun dalam segala hal.

10. Nidya Marchika dan Kania Amalia yang telah memberikan semangat dan banyak bantuan dalam mengerjakan laporan Tugas Akhir ini.
11. Brahmanu Wisnu Saputro, Habiyooso Rafli Dewanto, Ilham Nurirofiq, Ido Widya Yudhatama, dan Dimas yang banyak membantu penyusun saat kesulitan menyelesaikan laporan Tugas Akhir.
12. Jodie Steven dan Zulfikar Rizky Azhar sebagai teman seperjuangan yang memberikan banyak energi positif selama penyusun berkuliah di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS ini.
13. Teman-teman tersayang penyusun Clarissa Changraini, Anisya Purnamasari, Annisa Nur Amalia, Prita Meilyvia, Thalyta Rizkha Pradipta, Zahra Lutfiah, Pradita Kusumah, Arifa Nuriyani, Halida Azmi Falah, Mimi Nur Indah Sari, Dani Wulandari, Vigita Maria, dan Heti Pratiwi yang bersedia menemani penyusun dalam kondisi suka maupun duka, dalam keadaan emosi ataupun empati.
14. Mbak Aisyah Jati Putri, Mas Daniel Janthinus Kritianto, Mas Fakhri Aulia Abdillah, Mbak Anisa Riyanti, Mas Arif Rizaldy dan mas mbak pion sebagai kakak angkat penyusun yang banyak memberikan ilmu baik akademik maupun non akademik.
15. Wahyu Hidayat Nurdiansyah, Rachmad Abdhael Ghofoer, Zulfikar Rizky Azhar, Ichsan Salman, dan Remy Maulinda Rahmawati Subroto sebagai keluarga kecil yang memberikan arti besar terhadap penyusun.
16. Teman-teman MT16 yang selalu menjadi keluarga terbaik dan memberikan cerita bagi kehidupan penyusun yang tidak pernah terlupakan.
17. Serta seluruh pihak yang membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini dan seluruh pihak yang mendukung penyusun yang belum bisa penyusun tuliskan satu-persatu. Terima kasih banyak.

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Jember pada tanggal 18 Mei 1996. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Muhammad Ansori dan Dwi Endang Puji Rahayu. Riwayat pendidikan penulis adalah TK Pertiwi Jember, SMP Negeri 2 Jember, SMA Negeri 1 Jember, dan S1 Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember sampai sekarang.

Selama berkuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember penulis mengikuti kegiatan seminar, pelatihan, olah raga dan organisasi. Penulis pernah mengikuti pelatihan LKMM Pra Tingkat Dasar, LKMM Tingkat Dasar, Pelatihan Pemandu LKMM, dan LKMM Tingkat Menengah. Penulis pernah mengikuti kejuaraan futsal putri di dalam lingkup Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis pernah menjabat sebagai Wakil Sekretaris Umum Himpunan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS 2015/2016 dan Sekretaris Umum Himpunan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS 2016/2017. Selain itu, penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Fisika Material.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)